



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusintituut

**Kärt Metsoja**

**KOHALIKE GEODEETILISTE VÕRKUDE HOOLDAMISEST  
JA KASUTAMISEST TARTU LINNA NÄITEL**  
MAINTENANCE AND USE OF LOCAL GEODETIC NETWORKS  
ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF TARTU

Magistritöö

Geodeesia, kinnisvara- ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Tarmo Kall, *PhD*

Kaasjuhendaja: Janno Vään

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Kärt Metsoja		Õppekava: Geodeesia, kinnisvara- ja maakorraldus	
Pealkiri: Kohalike geodeetiliste võrkude hooldamisest ja kasutamisest Tartu linna näitel			
Lehekülgi: 119	Jooniseid: 29	Tabeleid:15	Lisasid: 3
Õppetool: ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Juhendaja(d): Kaitsmiskoht ja aasta:		Geomaatika 4. Loodusteadused ja tehnika, P515 Tarmo Kall (PhD), Janno Vään Tartu 2021	
<p>Tagamaks mõõtmist ühtses geodeetilises süsteemis, on Eesti suuremates linnades ja asulates pärast taasiseseisvumist rekonstrueeritud kohalikud geodeetilised võrgud. Kuigi praeguseks on nende tähtsus tänu kiirele ja kättesaadavale võrgu RTK meetodile vähenenud, pole kohalike võrkude hooldamisest Eestis loobutud. Üsna sageli jäävad kohaliku võrgu märgid ette ehitus- ja arendustöödele ja vajaldavad teisaldamist, mille käigus tuleb uutele märkidele nõuetekohase täpsusega koordinaadid mõõta ja arvutada.</p> <p>Minu magistritöö eesmärgid on 1) kindlaks teha, missugune on efektiivseim viis üksikutele kohaliku võrgu punktidele koordinaatide määramiseks ja 2) välja selgitada, kas kohaliku geoarhiivi andmete abil on võimalik saada ülevaadet sellest, kui palju kohalikku geodeetilist võrku üldse kasutatakse ja teha pilootuuring sel teemal.</p> <p>Võrdlesin kolme kohaliku geodeetilise võrgu punkti näitel erinevate mõõtemetodite (polügonomeetria, staatiline GNSS mõõdistus, võrgu RTK ja joonelis-nurgalise vastulõige, mille juures kasutatakse võrgu RTK meetodil mõõdetud ajutisi kindelpunkte) abil saavutatud täpsusi ja kulunud aega. Kõige täpsem meetod on polügonomeetria, mis garanteerib ka võrgu sisemise sidususe säilimise. Staatiline GNSS mõõdistus võimaldab aga kohalike võrke siduda kaasaegse ja hästi hooldatud aktiivse referentsraamistikuga ja seetõttu arvan, et seda võiks senisest enam kasutada. Võrgu RTK-l baseeruvad meetodid antud uurimuse kohaselt võrgu üksikute punktide mõõtmiseks ei sobi.</p> <p>Tartu linna Geoarhiivi andmete analüüsimisel selgus, et traditsiooniliste maamõõtetehnoloogiate kasutamisest on paljuski loobutud ja kohalik geodeetiline võrk leiab üsna vähest kasutust. Selle taustal ja võttes arvesse, et võrgud vajavad umbes paarikümne aasta järel täielikku rekonstrueerimist, tuleks kohalike võrkude tuleviku osas lähiaastail teha strateegilisi otsuseid.</p>			

Kohalike geodeetiliste võrkude kasutamine väärrib edaspidi laiemat uurimist (kaasates teisi asulaid, vaadeldes pikemat perioodi ja täpsustades valimi moodustamise metoodikat). Oma töös keskendusin plaanilistele koordinaatidele, kuid kindlasti tuleks vaadata ka kohalike kõrgusvõrkude kasutamist ja seda eriti nendes asulates, kus kõrgusvõrk on hiljuti rekonstrueeritud.

Märksõnad: kohalik geodeetiline võrk, passiivne referentsraamistik, geodeetiliste märkide teisaldamine

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kärt Metsoja		Curriculum: Geodesy and Land Management	
Title: Maintenance and use of local geodetic networks on the example of the city of Tartu			
Pages: 119	Figures: 29	Tables: 15	Appendixes: 3
Chair:		Geomatics	
Field of research and (CERC S) code:		4. Natural Sciences and Engineering, P515	
Supervisors:		Tarmo Kall (PhD), Janno Vään	
Place and date:		Tartu 2021	
<p>In order to ensure measurement in a unified geodetic system, local geodetic networks have been reconstructed in larger urban settlements of Estonia since regaining independence in 1991. Although their importance has decreased due to the fast and easily available network RTK method, the maintenance of local networks has not ceased in Estonia. Development and construction activities in the cities often bring about a need to relocate geodetic control points, during which the coordinates of new points have to be measured and calculated with the required accuracy.</p> <p>The objectives of my master's thesis are 1) to learn the most efficient way to determine the coordinates of individual points of the local network, and 2) to find out whether the local geo-archive data can provide an overview of the use of local geodetic networks and if so, conduct a pilot study on the subject.</p> <p>In the practical part of the work, I compared the accuracies achieved and time spent using different measurement methods (polygonometry, static GNSS measurement, network RTK, and resection combined with network RTK) in case of three local geodetic network points. The most accurate method is polygonometry, which also guarantees that the internal coherence of the network is maintained. However, static GNSS surveying allows local networks to be linked to a modern and well-maintained active reference framework, and I therefore think that it is justified to use the method more than it has been up to the present time. Study revealed that network RTK-based methods are not suitable for measuring individual points in a local geodetic network.</p> <p>The analysis of the data of the Geoarchive of the City of Tartu revealed that land surveying practices have changed in a way that traditional control point networks are used rather rarely. Against this background, and given that the networks need to be completely reconstructed every two decades, strategic decisions of how to continue with local networks are in order in the coming years.</p> <p>The use of local geodetic networks deserves further research (involving other cities and towns, looking at a longer period and specifying the sampling methodology). In my work, I focused on planar coordinates, but the use of local height control networks should definitely</p>			

be studied more thoroughly, especially in those settlements where the height network has been recently reconstructed.

Keywords: local geodetic network, passive reference frame, relocating geodetic control points

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	8
1. GEODEETILISTE VÕRKUDE PLANEERIMISE JA VIGADE TEOORIA ALUSED .	11
1.1. Mõõtevigade allikad ja liigid .....	13
1.2. Mõõtmiste liiasus, kaalud ja vähimruutude meetod .....	15
2. EESTI GEODEETILINE SÜSTEEM JA VÕRGUD.....	17
2.1. Võrkude ajalugu Eesti alal .....	18
2.2. Geodeetilised võrgud alates 1996. aastast .....	20
2.3. Kohaliku geodeetilise võrgu kujunemise lühiülevaade .....	23
2.4. Kohaliku geodeetilise võrgu rajamist ja rekonstrueerimist puudutav seadusandlus Eestis ja naaberriikides .....	28
3. MÕÕTMISVAHENDID JA MEETODID. JÄRELTÖÖTLUSTARKVARA .....	33
3.1. Kasutatud töövahendid .....	34
3.2. Polügonomeetriamõõtmine .....	35
3.3. Staatile GNSS mõõtmine .....	39
3.4. Võrgu RTK mõõtmine .....	41
3.5. Vastulõike meetod ja kombineeritud mõõtmine .....	44
3.6. Kõrguste mõõtmine.....	45
3.7. Järeltöötlus .....	46
4. MÕÕTMISED JA TASANDUSARVUTUSED TARTU LINNA ÜKSIKUTE KOHALIKU VÕRGU PUNKTIDE TEISALDAMISEL JA KONTROLLIMISEL .....	55
4.1. Geodeetiline märk 10031 Jaama tänava ja Rõõmu tee ristmikul.....	56
4.2. Geodeetiline märk 20087 Kopli tänaval .....	58
4.3. Geodeetiline märk 20064 Turu ja Ropka tänavate ristis.....	61
4.4. Mõõtmistele kulunud aeg ja üldised täpsust mõjutanud asjaolud.....	65
4.5. Tulemused ja analüüs.....	70

4.5.1.	KGV punkt 10031 .....	70
4.5.2.	KGV punkt 20087 .....	74
4.5.3.	KGV punkt 20064 .....	76
4.5.4.	Võrgu RTK mõõtmine.....	80
5.	TARTU KOHALIKU GEODEETILISE VÕRGU KASUTAMISEST .....	82
6.	ARUTELU .....	87
6.1.	Hinnang võrreldud meetoditele .....	89
	KOKKUVÕTE .....	93
	KASUTATUD KIRJANDUS JA ALLIKAD .....	95
	LISAD .....	101
	Lisa 1. Nõuded Soome kohaliku võrgu klass E5, Eesti KGV 2. järgu ja Läti kohaliku võrgu (VT) punktide mõõtmisele.....	102
	Lisa 2. Tasandusaruanne programmiga TBC .....	110
	Lisa 3. Väljavõte tasandusaruandest programmis SBG Geo .....	115

## SISSEJUHATUS

Maamõõtmine ühtses geodeetilises süsteemis on võimalik ainult tänu geodeetilistele võrkudele. Kuigi tänapäeval võib see võrk olla aktiivne (GNSS püsijaamade võrk) ja virtuaalne (võrgu RTK mõõtmisel), ei ole maastikul nõuetekohaselt kindlustatud punktidest koosnev traditsiooniline passiivne võrk Eestis oma tähtsust minetanud. Lisaks GNSS püsijaamade võrgu arendamisele ja tööshoidmisele säilitatakse jätkuvalt riiklike võrkude maastikul kindlustatud märke ning hoitakse ja parendatakse kohalikke geodeetilisi võrke.

Traditsiooniliselt on võrgud hierarhilise ülesehitusega. Algul määratakse suurema täpsusega võrk, mis on hõredam, järgnevalt tihendatakse seda võrku järjest väheneva täpsusega mõõdetud punktide võrguga (Randjärv 2002: 9). Selle põhimõtte väljaarendamisel olid määravaks kättesaadavad mõõtmis- ja arvutustehnoloogiad. Enne arvutite kasutuselevõttu sai tasandusarvutustes kasutada piiratud arvul punkte ning nurkade ja joonte mõõtmiseks oli vältimatult vajalik nähtavuse olemasolu (Engberg jt 2010: 2). Minevikus rajati ka plaanilisi ja kõrgusvõrke eraldi (samas). Eestis töötati integreeritud geodeetiliste võrkude kontseptsioon välja juba 1990. aastatel (Randjärv 2002: 14) ja selle kohaselt on näiteks kõrgusvõrgu koosseisu lülitatud ka plaanilise või gravimeetilise võrgu punkte (Geoportaal 2019), osaliselt püsivad kõrgusvõrk, gravimeetiline võrk ja plaanilised võrgud siiski eraldi. Plaanilised geodeetilised võrgud Eestis jagunevad riiklikeks ja kohalikeks. Riiklikku geodeetilisse võrku kuuluvad I ja II klassi ning tihendusvõrgu punktid, kohalikesse geodeetilistesse võrkudesse 1., 2. ja 3. järgu geodeetilised punktid.

Igapäevatöös kasutavad geodeedid ennekõike kohaliku geodeetilise võrgu (KGV) punkte, mis asuvad asulates piisava tihedusega selleks, et neid mõõdistuse lähtepunktidenä kasutada. KGV tähtsus on oluliselt vähenenud tänu satelliitmõõdistamise arengutele. Kiire, lihtne ja odav võrgu RTK mõõtmine tagab piisavalt usaldusväärse sidumise riikliku geodeetilise süsteemiga ja ka tahhümeetrilise mõõtmise lähtepunktidenä kasutatakse laialdaselt sel meetodil rajatud ajutisi kindelpunkte. Näiteks Rootsis on kohalike plaaniliste võrkude jätkuvast ülalpidamisest loobunud



(Alfredsson jt 2019). Ka teiste riikide uurijad leiavad, et tänu paarisentimeetrise täpsusega võrgu RTK-le on traditsioonilised maamõõtmistehnoloogiad pea täielikult hüljatud (nt Poutanen ja Häkli 2018: 118).

Eesti 65 linnas või asulas on kohalik geodeetiline võrk rekonstrueeritud aastatel 1996–2019. Viimati rekonstrueeriti võrk Viimsi vallas aastatel 2018–2019 (Geoportaal 2019). Aastatel 2000–2001 leiti teisendusparameetrid ja arvutati koordinaadid ümber riiklikku geodeetilisse süsteemi 87 linna või asula võrkudele (samas).

Geodeetiliste märkide kaitset reguleerib Ruumiandmete seadus (RT I, 28.02.2011, 2, lühend RAS) ning keskkonnaministri määrus “Geodeetiliste tööde tegemise ja geodeetilise märgi tähistamise kord, geodeetilise märgi kaitsevööndi ulatus ning kaitsevööndis tegutsemiseks loa taotlemise kord” (edaspidi *Geodeetiliste tööde kord*) ning riigi kaitse all on nii riikliku kui kohaliku võrgu märgid. Võrreldes hõredamalt asuvate ja tugevamalt kindlustatud riikliku võrgu punktidega ähvardab KGV punkte palju enam juhuslik hävimine või teisaldamise vajadus arendus- ja ehitustööde tõttu. Ehitustööde korral märgi kaitsevööndis tuleb märk kas nõuetekohaselt teisaldada või kontrollida, ega tööd pole märgi asukohta mõjutanud.

Töötades geodeesiaettevõttes olen viimasel aastal selliste teisaldamistööde ja kontrollmõõtmistega kokku puutunud ning otsustasin magistritöös seda teemat veidi avada.

Minu magistritööl on kaks eesmärki:

1. Kindlaks teha, missugune on kõige efektiivsem viis üksikute KGV 2. järgu punktidele koordinaatide määramiseks selliselt, et need vastaksid ettenähtud täpsusnõuetele.
2. Selgitada välja, kas kohaliku geoarhiivi andmete abil on võimalik saada ülevaadet sellest, kui palju KGV-d üldse kasutatakse ja teha esmane pilootuuring sel teemal.

Otsin vastust kolmele küsimusele:

1. Kas olemasolevatest seadustest, määrustest ja juhenditest leiab selged nõuded KGV üksikute punktide teisaldamiseks ja kontrollmõõtmiseks?
2. Missugune meetod on sellisteks mõõtmisteks kõige efektiivsem ja kas seadusi-määrusi-juhendeid peaks alternatiivsete meetodite lisamisega täiendama?

3. Missugust infot leiab Tartu linna Geoarhiiv registreeritud topogeodeetiliste tööde ja teostusmõõdstuste aruannetest KGV punktide kasutamise kohta milline on KGV punktide kasutusintensiivus neile andmetele tuginedes?

Töö koosneb kuuest peatükist. Esimeses vaatlen lühidalt geodeetiliste võrkude planeerimise ja vigade teooria aluseid. Teises peatükis annan ülevaate Eesti geodeetiliste võrkude ajaloost ja ülesehitusest ning uurin, kas KGV temaatikat kajastatakse teaduskirjanduses, nii Eestis kui mujal. Seejärel annan ülevaate, kuidas KGV valdkond Eestis seadusandlikult reguleeritud on ja võrdlen seda naaberriikidega. Töö praktilises osas (kolmas ja neljas peatükk) analüüsin paari näite varal, kuidas oleks kõige otstarbekam KGV punkte kontrollida ning teisaldatud punktidele koordinaate leida. Töös keskendun plaanilistele koordinaatidele. Viiendas peatükis uurin, kui suurt kasutust leiab Tartu linna KGV, analüüsid selleks Tartu piirkonna geomõõdistuste infosüsteemis registreeritud töid. Töö arutelu osas võtan kokku praktiliste eksperimentide tulemused ja seda osaliselt viiendast peatükist pärit info valguses. Töö lõppeb kokkuvõttega.

Täna ligipääsu andmise eest geoarhiivile Tartu linna Geodeesiateenistust. Lisaks minu headele juhendajatele aitasid töö valmimisele kaasa geomaatika õppetooli töötajad Harli Jürgenson ja Kristina Türk. Aitäh!

# 1. GEODEETILISTE VÕRKUDE PLANEERIMISE JA VI-GADE TEOORIA ALUSED

Geodeetiliste võrkude planeerimise, mõõdistamise, mõõtmistulemuste tasandamise, võrkude täpsuse ja usaldusväärsuse teemal on kirjutatud arvukalt uurimusi: monograafiad, kõrgkooliõpikuid ja artikleid. Mõned neist kuuluvad juba teadusajaloo valda, kuigi mitmed 19. sajandil või varemgi välja töötatud valemid ja esile toodud probleemid on universaalsed ja siiani aktuaalsed. Näiteks sõnastas 1868. aastal Friedrich R. Helmert oma doktoridissertatsiooni sissejuhatavas peatükis, et (triangulatsiooni)võrgud tuleb rajada võimalikult ratsionaalselt, nii et vajalik täpsus oleks tagatud võimalikult väikese ajakuluga ja võimalikult odavalt (Helmert 1868: 1). Gerhard Beutler (2004) kutsub üles tegema vahet teadusliku küsimuse ja tehnoloogiliste vahendite vahel, mille abil sellele küsimusele vastust otsitakse ja leiab, et geodeesias esitatakse paljuski samu küsimusi, mis olid kesksed juba 19. sajandil.

Helsingi Tehnikaülikooli professor Reino Antero Hirvonen kirjutas 1961. aastal vajadusest geodeesias lisaks laialt tuntavale ja kasutatavale mõõtmisvigade teooriale rohkem kaasata moodsa statistika meetodeid, nimetades toonast olukorda murranguliseks. Sama kümnendi teisest poolest kasvas plahvatuslikult võrgutasandusele pühendatud uurimuste hulk. Arvutiajastu lõi eeldused paljude probleemide lahendamiseks juba enne reaalseid mõõtmistöid (Baarda 1967: 8). Sellest ajast alates on ilmunud ridamisi uurimusi, mis tegelevad geodeetiliste võrkudega seonduvate tööde jaoks optimaalsete meetodite leidmise, jämedate vigade avastamise, algoritmide loomise ja nende testimisega simuleeritud või reaalelulistel situatsioonides (nt Baarda 1968; Baarda 1973; Pope 1976, Grafarend 1974; Welsch 1979; Koch 1982; Grafarend ja Sansò (*toim*) 1985; Papo 1985; Knight jt 2010; Hekimoglu ja Erdogan 2012 ; Rofatto jt 2018, Klein jt 2019). Baarda (1968) meetodit peetakse geodeetilise andmestiku analüüsis siiani üheks paremaks ja enamik kaasaegseid tasandustarkvarasid seda ka kasutavad. Meetod on kolmeetapiline. Esmalt stohhalistilise mudeli kontroll – kas kaalud on valitud õigesti ja mõõtmistäpsus vastab ootustele. Seejärel mõõtmistulemuste erindite e jämedate vigade välja

selgitamine (*data snooping* test). Kolmandaks erindite elimineerimine, misjärel tehakse uus tasandus.

Erik W. Garfarend (1974) jaotas võrkude planeerimisega seotud probleemid nelja rühma:

- Nulltaseme planeerimine: võrgule optimaalse referentssüsteemi (daatumi) valimine;
- Esimese taseme planeerimine: võrgu optimaalse geomeetrilise konfiguratsiooni valimine;
- Teise taseme planeerimine: vaatluste jaoks optimaalsete kaalude valimine;
- Kolmanda taseme planeerimine: olemasoleva võrgu parendamine.

Tema ja Fernando Sansò (1985) toimetatud mõjukas kogumik “Optimization and Design of Geodetic Networks” tutvustas klassifikatsiooni veelgi ja see on siiani erialakirjanduses laialt kasutatav. Ükskõik, mis grupi probleemiga tegemist on, eesmärgiks on optimeerida: maksimeerida täpsust ja usaldusväärsust ning minimeerida hinda.

Kui Hirvonen rääkis täiesti uuest olukorrast seoses matemaatilise statistika võimalustega, siis Beutler (2004) nimetab revolutsiooniliseks muutusi, mille on toonud kaasa kosmoseajastu. Geodeetiliste võrkude, sh kohalike geodeetiliste võrkude puhul on murranguline muutus olnud GNSS tehnoloogia kasutuselevõtt. Mõõtmisvigade teooriat, tasandamismeetodeid (vähimruutude meetod) ja võrkude hierarhilise ülesehituse põhimõtet see aga oluliselt muutnud ei ole.

Hirvoneni sulest ilmus vähimruutude meetodile pühendatud monograafia ("Adjustments by least squares in geodesy and photogrammetry") aastal 1971, tänapäevaks on see üks paljude hulgas. Veidi uuem klassikaline teos, mis võrkude tasandamisest põhjaliku ülevaate annab ja mida kõrgkoolides laialt õppematerjalina kasutatakse, on Charles D. Ghiliani ja Paul R. Wolfi (2006, esmatrükk 1997) "Adjustment Computations. Statistics and least Squares in Surveying and GIS". Eestikeelse õppevahendi mõõtmistulemuste matemaatilisest töötlemisest on kirjutanud Jüri Randjärv, sellele keskendub kõrgkooliõpikute sarja Geodeesia III osa (2007, esmatrükk 1999). Täielikult KGV teemale on pühendatud Geodeesia IV osa (Randjärv 2002). Kui Randjärve raamatud on suunatud eeskätt Eesti Maaülikooli geodeesia õppekava tudengitele, siis Tallinna Tehnikaülikool on oma õppureile kirjastanud “Geodeetiliste mõõtmiste

andmetöötuse teooria alused” (Kala 2009) ja “Kõrgem Geodeesia. Polügonomeetria ja kõrgtäpne nivelleerimine” (Kala, Ellmann ja Märdla 2015).

Satelliitgeodeesia eestikeelse õppevaramu hulka kuulub Rüdja ja Sanderi „Globaalne asukohamääramine“ (2013) ja ilmumas on kõrgkooliõpik „GNSS – globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem geodeetilise täpsusega asukohamääranaguks“ (Liibusk, Ellmann, Kall, Kollo 2021).

KGV üksikute punktide teisaldamise ja kontrollmõõtmise puhul on mänguruum üsna ahas. Ülejäänud võrgu geomeetria on juba paigas ja teisaldamiseks sobivate kohtade valik tihedasti täis ehitatud linnas pole enamasti kuigi suur. Ehitised ja puud-postid võivad varjata vaatevälja, maa-alused kommunikatsioonid seavad omakorda piiranguid. Siiski aitab ka nendel töödel teha paremaid valikuid võrkude rajamise, mõõtmise ja andmetöötuse üldiste põhimõtete tundmine. Kesksel kohal on aga mõõtevigade teooria, mille võib kokku võtta järgnevalt:

- kõik mõõtmised sisaldavad vigu;
- hoolikalt valitud metodoloogia aitab vigu vähendada;
- vigade avastamiseks ja mõõdetud suuruse täpsema väärtuse leidmiseks on vaja teha täiendavaid ehk liigimõõtmisi;
- üksikute mõõtmiste täpsus võib erineda, mõõtmistel on erinev kaal;
- mõõdetud suuruse kõige tõenäolisem väärtus leitakse andmetöötuse käigus tasandusarvutuste abil.

## **1.1. Mõõtevigade allikad ja liigid**

Absoluutselt täpseid mõõtmistulemusi pole võimalik saavutada. Vigu põhjustavad mõõtmistingimused (objekt, instrument, vaateleja, välistingimused) ja nende tekkepõhjused jaotuvad järgmiselt:

- instrumentaalsed vead (mõõtevahendite konstruktsioonist tulenevad või kalibreerimise ja korrashoiuga seotud);

- keskkonnatingimustega seotud vead (nt muutused temperatuuris, õhurõhus, tuule kiiruses, gravitatsiooni- ja magnetväljades);
- inimlikud vead, mis tulenevad meeelundite piiratusest (võime võtta täpset lugemit, määrata vesiloodi muli asendit vms) (Ghiliani ja Wolf 2006: 3).

Saadud vead omakorda jagunevad:

- jämedad vead ehk eksimused;
- süstemaatilised vead ja
- juhuslikud vead (Ghiliani ja Wolf 2006: 4).

Jämedat viga sisaldav tulemus on vaja avastada ja tasandusarvutustest välja jätta. Süstemaatilised vead võivad olla muutumatud (mõjutada mõõtmistulemusi kindlas suunas teatud kindla suuruse võrra), osaliselt muutuvad (vea suurus on sama ja suund/märk muutub või vastupidi, märk on sama, aga suurus muutub), progresseeruvad ja konsolideeruvad (kasvavad või kahanevad mõõtmiste jooksul pidevalt), perioodilised (muudavad märki või kasvavad/kahanevad teatud perioodi tagant) ning keerukad (kasvavad/kahanevad ning muudavad märki keerukate seaduspärasuste kohaselt). Süstemaatiliste vigade kõrvaldamiseks või mõju vähendamiseks on vaja selgitada nende tekkepõhjused ja ilmutamise seaduspärasused. Seejärel on võimalik saadud mõõtmistulemustele arvutada parand või korraldada mõõtmised selliselt, et süstemaatiliste vigade mõju on elimineeritud. Näiteks nurkade mõõtmine täisvõtetega elimineerib kollimatsiooni- ja inklinatsioonivea mõju. (Kala 2009: 61; Randjärv 2002: 27)

Erinevalt süsteemsetest vigadest ei ole juhuslike vigu võimalik vältida. Juhuslike vigade põhiomadused on järgnevad:

- antud mõõtmistingimuste puhul juhuslike vigade absoluutväärtus ei ületa teatud piirväärtust;
- absoluutväärtuselt võrdseid positiivseid ja negatiivseid vigu esineb võrdse sagedusega;
- väikesi juhuslike vigu esineb mõõtmistulemuste hulgas rohkem kui suuri;
- juhuslike vigade aritmeetiline keskmine läheneb nullile kui mõõtmiste arv läheneb lõpmatusele. (Kala 2009: 61; Randjärv 2002: 29)

Juhuslikud vead alluvad normaaljaotusele, st et 68% vigadest ei ületa antud mõõtmistulemustele vastavat standardhälvet  $\pm 1\sigma$  ja 95% ehk viis viga sajast ei ületa  $\pm 2\sigma$ . Geodeetiliste juhendite koostamisel loetakse tavaliselt veaks  $\pm 2\sigma$  (või kahekordne keskmine ruutviga) (Randjärv 2002: 30).

## 1.2. Mõõtmiste liiasus, kaalud ja vähimruutude meetod

Et avastada mõõtmistulemustes õigeaegselt jämedad vead ja tõsta tulemuste täpsust, mõõdetakse iga suurust mitu korda. Liigmõõtmised on need mõõtmised, mis ületavad tundmatu suuruse leidmiseks vajaliku miinimumi. Näiteks ühe joonepikkuse mõõtmisel kaks korda tehakse üks liigmõõtmine. Liigmõõtmised võimaldavad arvutada mõõtmistulemuste keskmised ehk kõige tõenäolisemad väärtused ja anda saadud keskmisele väärtusele veahinnangu. Kolmnurga kõikide sisenurkade mõõtmisel tehakse üks lisamõõtmine, sest kolmanda nurga saaks arvutada hulknurga sisenurkade summa valemi abil. Kõikide nurkade summa kokku liitmisel saame teoreetilisest väärtusest veidi erineva suuruse. Selleks, et mõõdetud suuruse praktiline summa oleks võrdne nende teoreetilise summaga, tuleb neid väärtusi parandada ehk tasandada. Liigmõõtmine on vajalik nii vea avastamiseks, kui selleks, et oleks võimalik teha tasandusarvutus. (Randjärv 2007: 67)

Kuna geodeetilised mõõtmised toimuvad erinevates tingimustes, on saadud tulemused erineva täpsusega, neil on erinevad keskmised ruutvead. Erineva täpsuse arvestamiseks lõpptulemuse leidmisel kasutatakse abiarve: mõõtmiste kaalusid. Kaalud väljendavad üksikute mõõtmistulemuste mõju kogutulemusele (Kala 2009: 75).

Vähimruutude meetodi põhimõte seisneb selles, et mõõtmistulemustele antavad parandid peavad rahuldama esmalt tingimust

$$\sum p v^2 = \min,$$

kus  $p$  on mõõtmistulemuste kaal ja  $v$  on otsitav parand. Kõigist võimalikest võrrandisüsteemi lahenditest valitakse selline, kus parandite ruutude ja vastavate kaalude korrutiste summa on

minimaalne (Ghiliani ja Wolf 2006: 8). Ühtede parandite suurendamisel vähenevad teised, nii et saadakse optimaalseim suhe. Parandi absoluutväärtus peab olema pöördvõrdeline mõõtmiste kaaluga (Randjärv 2007: 69).

Vähimruutude meetod baseerub tõenäosusteoorial. Maatriksarvutuse abil lahendatakse võrrandid, mis seovad tundmatud (koordinaadid) mõõtmistega (suunad ja kaugused). Vähimruutude meetodi kasutamiseks peab mõõtmisi olema sama palju või rohkem kui on tundmatuid. Seda nimetatakse vabadusastmete arvuks (vabadusastmete arv võrdub liigmõõtmistega)

$$r(\text{vabadusastmete arv}) = M(\text{mõõtmised}) - N(\text{tundmatud})$$

Meetod annab (eeldusel et vabadusastmete arv on suurem kui null), lisaks koordinaatide parandatud väärtusele ka hinnangu nende tulemuste määramatusele. Suurem vabadusastmete arv tagab enamasti parema lahenduse (Ghiliani ja Wolf 2006: 8). Minu kasutatud tasandustarkvara, SBG Geo kasutusjuhendis (User manual... 2017) soovitatakse andmehulka siiski redutseerida, enne tasandamist arvutada välja mõõtmistulemuste keskmised, et mitte luua võrgu usaldusväärsusest petlikku muljet.

Vähimruutude meetodit kasutades tuleb esmalt teha läbi vähimate piirangutega ehk vaba tasandus ja siis seotud tasandus. Vaba tasanduse puhul peavad andmed rahuldama võrgus kehtivaid geomeetrilisi tingimusi ja tulemused ei sõltu lähtepunktide kvaliteedist vaid ainult mõõtmiste täpsusest. Kaaluühiku standardhälve näitab, kui hästi sobib eeldatav, *a priori* standardviga tasandamisjärgsega. Peale tasandust võib võrrelda *a priori* veahinnanguid *a posteriori* hinnangutega  $\chi^2$  testi abil. (Ghiliani ja Wolf 2006: 412)

Andmetöötamise käigus tuleb mõõtmisandmete hulgas eemalda kõik jämeda veaga tulemused. Kui selle tulemusena võrgu liiasus kannatab, tuleb sooritada lisamõõtmisi. Kuigi kaal on suhteline suurus ja mõõtmistulemust ei muuda, oleneb õigesti valitud kaaludest ühelt poolt jämedate vigade avastamine ja teisalt see, et me kergekäeliselt ei jätaks välja „korralikke“ mõõtmisi, mis võiksid tulemuse täpsust tõsta, mitte seda langetada. Lisaks annavad õigesti valitud kaalud lõpptulemuste (koordinaatide) realistlikud täpsushinnangud.



## **2. EESTI GEODEETILINE SÜSTEEM JA VÕRGUD**

Eestis, nagu teisteski Euroopa riikides, on Garfarendi välja toodud nulltaseme planeerimisülesanne ehk võrgule optimaalse referentssüsteemi (daatumi) valimine lahendatud rahvusvaheliste kokkulepetega. 1990. aastal otsustati Euroopas kasutusele võtta ühtne referentssüsteem. Euroopa terestiline referentssüsteem (ETRS89) langeb kokku rahvusvahelise referentssüsteemiga ITRS epohhil 1989.0 ja on seotud Euraasia laama stabiilse osaga. Referentsellipsoidiks on GRS80. (Euref 2020)

ETRS89 realiseerimiseks Eestis on I klassi geodeetilise võrgu punktid ja nende koordinaadid. Eestis tähistatakse ETRS89 realiseerimise ruumilisi ristkoordinaate ja geodeetilisi koordinaate lühendiga EUREF-EST97 (Eesti geodeetiline süsteem 2020).

Geodeetiline süsteem koosneb:

1. geodeetilisest referentssüsteemist - ETRS89;
2. tasapinnaliste ristkoordinaatide süsteemist - L-EST97;
3. kõrgussüsteemist - EH2000;
4. gravimeetrisest süsteemist - EG2000;
5. nimetatud süsteemidele vastavatest võrkudest (Geodeetiline süsteem 2011 § 3–6).

## 2.1. Võrkude ajalugu Eesti alal

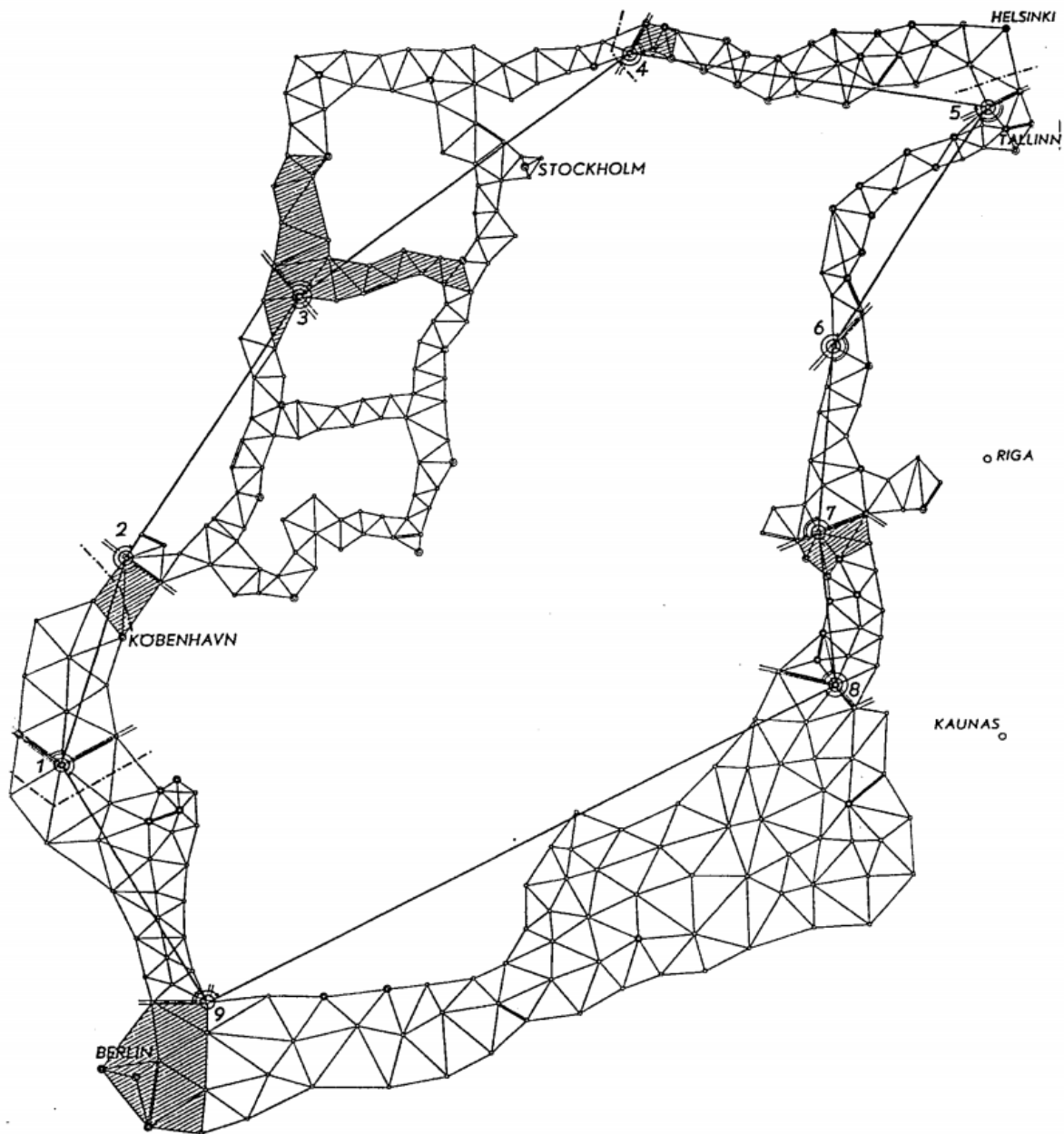
Ulatuslikke triangulatsioonitöid hakati Eesti aladel tegema juba 19. sajandi alguses, kui Eesti kuulus Vene Keisririigi koosseisu. Eestvõtjateks olid Friedrich Georg Wilhelm von Struve, Carl Friedrich Tenner ja Theodor Friedrich von Schubert. Lisaks omaaegsele tõelisele suurettevõtmisele, Struve ja Tenneri tehtud kaaremõõtmisele (vt lähemalt nt Kollo ja Valder 2012), väärrib mainimist Liivimaa triangulatsioon. Triangulatsiooni tellis Struvelt Liivimaa Üldkasulik ja Ökonoomiline Sotsietet ja sellega loodi geodeetiline alus Carl Gottlieb Rückeri Liivimaa atlasel. Schubert viis läbi Läänemere ranniku trigonomeetrilise mõõdistamise. Struve oma mõõtmistel ei kindlustanud triangulatsioonipunkte, pidades neid oluliseks vaid käsiloleva mõõtmise seisukohalt, Tenner ja Schubert aga kindlustasid ja löid niimoodi võimaluse neid uutesse triangulatsioonivõrkudesse kaasata. (Torim 1991)

19. sajandi lõpul ja 20. sajandi alguses viis geodeetilisi töid Eesti alal läbi Sõjaväe Topograafide Korpus. Sel perioodil tehti järgmised tööd:

- Peterburi ja Eestimaa kubermangu triangulatsioon (1892). Lähtepunktiks oli Pulkovo observatoorium, arvutused tehti Clarki ellipsoidil;
- Lõuna-Eestit haaranud Lääne piirivööndi triangulatsioon. Lähtepunktiks oli Tartu observatoorium, arvutustel võeti aluseks Besseli ellipsoid. (Rüdja 2004, Torim 1991)

Eesti Vabariigi algaastail tehti riigi idaosas triangulatsioonitöid, mille tulemusena rajati Vene triangulatsioonipunkte lähtepunktidenä kasutades madalama klassi võrk (Torim 1991).

1924. aastal astus Eesti Vabariik Balti Geodeesia Komisjoni liikmeks. Selle komisjoni põhiülesandeks oli geoidi kuju määramine Läänemere piirkonnas. Aastatel 1925–1935 rajati Eesti I klassi triangulatsioonivõrk mööda Liivi lahe kirderannikut saartelt Tallinnani. Ahel seoti üle lahe Soome triangulatsiooniga ja lõunas Läti võrguga ühtsesse Balti (Läänemere ümbruse) ringahelasse (joonis 1). (Randjärv 1997, Rüdja 2004, Torim 1991)



**Joonis 1.** Balti triangulatsiooniahel (Ekman 1998).

Samal ajal jätkati triangulatsioonitöid Eesti kirde- ja kaguosas. I klassi triangulatsioonivõrku hakati arendama põhjas Narva ja Vaivara aluspunktidest ning lõunas Munamäe ja Meremäe aluspunktidest. Põhja-Eestis arvutati triangulatsioon ikka Pulkovo süsteemis, Lõuna-Eestis Tartu süsteemis. Seetõttu koosnes Eesti Vabariigi ajal rajatud triangulatsioonivõrk algselt kahest omaette süsteemist, mida nimetati põhja- ja lõunasüsteemiks. 1938. aastaks valmis 118 punktist

koosnev I klassi võrk, mis viidi ühtsesse süsteemi ja tasandati. Paralleelselt I klassi triangulatsiooni rajamisega toimus selle täiendamine madalamate järkudega ja tehti nivelleerimistöid ja gravimeetrilisi mõõtmisi. (Randjärv 1997; Rüdja 2004; Torim 1991)

1940. aastaks olid Eestis rajatud järgmised võrgud:

- I–IV järgu triangulatsioonivõrk (kõrgtäpne);
- I ja II järgu polügonomeetriavõrgud;
- täpne nivelleerimisvõrk;
- gravimeetriline võrk. (Randjärv 1997; Torim 1991)

Aastatel 1941–1945 tasandati uuesti kogu Venemaa astro-geodeetiline võrk. Eesti triangulatsioonivõrk koos Läti ja Leedu võrkudega viidi üle Pulkovo 1942 daatumisse (Randjärv 1997: 13). Eesti I klassi triangulatsioonivõrk seoti Nõukogude Liidu (NL) I klassi triangulatsiooniga. Kogu NL territooriumil arvutati aastatel 1946–1990 punktide geodeetilisi koordinaate Krassovski referentsellipsoidil ja ristkoordinaate Gauss-Krügeri konformse pöiksilindrilise projektsiooni tasandil (Randjärv 2002: 22).

## **2.2. Geodeetilised võrgud alates 1996. aastast**

Veerand sajandi eest, aastal 1996, alustati uue 212 punktist koosneva riigi geodeetilise võrgu (RGV) rajamisega. Võrk rajati plaanilise, kõrgusliku ja gravimeetrilise võrgu integreerimise põhimõtteid järgides. Mõõtmiste tehnoloogia vastas EUREF tehnilise töögrupi nõuetele. (Geoportaali 2020)

RGV mõõdeti GPS tehnoloogiat kasutades ja jaotati klassidesse (tabel 1, andmed Geoportaali 2020). RGV rajamisega samaaegselt alustati KGV rekonstrueerimisi.

**Tabel 1.** 1996 – 2001 rajatud Eesti riiklik geodeetiline võrk (andmed Geoportaal 2020).

Võrgu klass	Punktide arv võrgus	Punktidevaheline kaugus	Punktide määramise krv	Suhteline viga
I klass	13 (sh Suurupi püsijaam)	70-110 km	±1 cm	1/700000
II klass	199	u 15 km	±1 cm	1/500000
Tihendusvõrk	3922 (paarispunktid)	Keskmiselt 5 km (paarispunktide omavaheline u 500 m )	±1-3 cm	1 /250 000; paarispunktide omavaheline 1/50 000

KGV, millest tuleb pikemalt juttu allpool, jaotati hierarhiliselt samuti kolmeks:

- 1. järk (staatilise GNSS tehnoloogiaga rajatud punktid);
- 2. järk (polügonomeetria);
- 3. järk – varasema KGV punktid, mis on uutest mõõtmistest välja jäänud ja saanud oma koordinaadid transformeerimise teel.

Aastatel 2003–2016 rekonstrueeriti ka Eesti kõrgusvõrk. Vastavalt integreeritud geodeetilise põhivõrgu kontseptsioonile lülitati rekonstrueeritava kõrgusvõrgu koosseisu nivelleerimistrasidel või nende vahetus läheduses paiknevad riigi geodeetilise põhivõrgu I ja II klassi ning gravimeetrilise põhivõrgu punktid ja veemõõdujaamad. Eesti kõrgusvõrk on alates 2018. aastast seotud Euroopa vertikaalse referentssüsteemiga (EVRS - European Vertical Reference System), mille nullpunktiks on Amsterdami nullpunkt ( NAP - Normaal Amsterdam Peil). Koos riikliku kõrgusvõrgu rekonstrueerimisega tehti töid kohalike kõrgusvõrkude rekonstrueerimiseks. Kohalikke kõrgusvõrke rekonstrueeriti kümnes linnas: Haapsalu, Kuressaare, Pärnu, Valga, Viljandi, Võru, Narva, Rakvere, Jõhvi ja Kohtla-Järve. Aastatel 2017–2018 rekonstrueeriti Tartu kohalik kõrgusvõrk koostöös Tartu Linnavalitsusega. (Geoportaal 2020)

Gravimeetiline võrk on samuti jagatud klassidesse: I, II, ja III. Raskuskiirenduse absoluutväärtused I klassi punktidel on mõõdetud aastatel 1995, 2007, 2008, 2013. ja 2017. II ja III klassi raskuskiirenduse väärtused on mõõdetud relatiivgravimeetritega (esmalt aastail 2001–2004 USA koostööpartneritelt laenatud instrumentidega ja kuni praeguseni jätkuvad mõõtmised Maamatile kuuluvate gravimeetritega). (Geoportaal 2020)

Lisaks passiivsetele võrkudele on Eestis olemas ka GNSS püsijaamade võrgud. Kui esialgselt kuulus RGV I klassi vaid üks, Suurupi püsijaam, siis nüüd on Maa-ameti moderniseeritud püsijaamade võrgus ESTPOS 28 püsijaama, mis on arvatud RGV II klassi osaks ja vastavalt geodeetilise süsteemi määrusele on Eesti GNSS püsijaamade võrk seega aluseks teistele geodeetilisele referentssüsteemi realiseerimisele Eestis. Koos ESTPOSi arendamisega on RGV I järgu passiivsed punktid alates nende rajamisest 1996. aastal kaks korda üle mõõdetud. Kuna püsijaamad asuvad enamasti hoonete katusel, pole võimalik nende kõrgtäpne nivelleerimine ja praegu nende kõrguslikku olukorda, erinevalt näiteks Soomest, ei jälgita. Trigonomeetriline nivelleerimine võimaldaks GNSS aegridade kvaliteeti siiski kontrollida. (Metsar jt 2018)

Oma püsijaamad on ka kolmel kommertsteenusepakkujal. Seisuga 10.04.2021 on Geodeetiliste punktide andmekogus 20 Trimble VRS NOW püsijaama, 23 Hades Invest GNSS püsijaama ja 1 Ivaneti püsijaam. Geodeetiliste punktide andmekogus on kommertspüsijaamadele antud RGV hierarhias tihendusvõrgu staatus (Geoportaal 2020).

Kommertsjaamadele arvutab Maa-amet samuti parandeid, et tagada kõikide Eesti püsijaamade kokkusobivus riikliku geodeetilise süsteemiga. ESTPOSi saavad kasutada Maa-amet, muud riigiametid ja teadusasutused. Missuguseks peaks kujunema kommertsjaamade ja riikliku ESTPOS süsteemi omavaheline koostöö, pole veel selge (Metsar jt 2018).

Nagu näha, on pilt võrreldes 1990. aastatega, kui uus geodeetiline süsteem esmalt kehtestati, oluliselt muutnud ja kohati segasemaks. Traditsioonilise hierarhia asemel on kaks paralleelset hierarhilist süsteemi ja kui enne olid geodeetiliste võrkude omanikeks vaid riik ja kohalikud omavalitsused, siis nüüd on lisandunud eraettevõtted.

### 2.3. Kohaliku geodeetilise võrgu kujunemise lühiülevaade

Teadusajakirjades ja konverentsikogumikes leidub arvukalt riiklike või kõrgema taseme geodeetiliste võrkudega seonduvat (viimasel ajal eriti GNSS püsijaamade võrkude kohta), aga KGV seonduvat küsimused on pigem praktilist laadi ja rahvusvahelistes väljaannetes neile palju tähelepanu ei pöörata. See on igati mõistetav – tegemist on lokaalse uurimisküsimusega, mille teoreetiline baas ei erine kuidagi kõrgema taseme geodeetiliste võrkude omast. Enam infot KGV-de kohta leiab seadustest, määrustest, erinevatest aruannetest. Leidub üksikuid artikleid, mis analüüsivad kohaliku geodeetilise võrgu või mõõdistamisvõrgu rajamiseks sobivat meetodikat ja täpsust (nt Fladarova ja Štroner 2019; Štroner jt 2013) või mõne konkreetse asula geodeetilise võrguga seonduvat. Näiteks on analüüsitud Riia (Celms jt 2018) ja Jürmala (Celms jt 2019) linnade kohalike võrkude seisukorda, Serbia küla Vojvoda Stepa võrgu rekonstrueerimise kavasid (Marinković jt 2018) ja Valencia esimese linnakaardi aluseks olnud triangulatsioonivõrku aastatest 1929–1944 (Villar-Cano jt 2019).

Eestis on KGV teemadel kirjutatud kohalikule lugejaskonnale ja eriti tänuväärseks uurimismaterjaliks on nad olnud tudengitele. Lisaks ülalmainitud Gedeesia IV osale (Randjärv 2002) leiab väikse alapeatüki kohalike geodeetiliste võrkude kohta Andres Rüdja ja Janika Sanderi õpikust „Globaalne asukohamääramine“ (Rüdja ja Sander 2013: 140–142).

Heiki Potter ja Ivar Treikelder (2010) annavad ülevaate geodeetiliselt põhistatud mõõdistamise algusest Tallinna linnas, mis sai oma esimese geodeetilise põhivõrgu 19. sajandi esimesel poolel, mil valmis triangulatsioonivõrk. Sajandi teisel poolel järgnes kõrgusvõrgu mõõdistamine. Läänemere triangulatsiooni punktide kataloog Tallinna sarase piires ja läheduses sisaldas kuus esimese klassi punkti, ühe teise klassi punkti ja 30 kolmanda klassi punkti. Triangulatsioonivõrgu punkte tähistasid kõrgrajatised (kiriku- ja linnamüüri tornid, mastid, vabrikukorstnad), kolmanda klassi punktidel määrati koordinaadid nurklõigetega. Artikli ilmumise ajaks olid kolmanda klassi punktidest säilinud pooled (Potter ja Treikelder 2010: 37).

Jüri Pertmanni magistritöös (2007: 26 ja seal viidatud kirjandus) on ülevaade Tartu kohaliku võrgu arengust. Esimene geodeetiline põhivõrk rajati siin aastal 1901 Liivimaa Ökonoomilise Sotsieteedi kultuur-tehnika büroo poolt linna ala mõõdistamiseks. See ühest põhipolügoonist ja

tollega süsteemitult ühendatud 64 täiendavast polügoonist koosnev võrk koosnes 18 põhi- ja 319 täiendavast punktist, mis tähistati tammepuust pakkudesse löödud naeltega. Neid märke säilinud ei ole.

Võrdluseks – Liivimaa kubermangu pealinnas Riias loodi esimene triangulatsioonivõrk aastatel 1880–1882 linna ehitusameti tellimusel (Celms jt 2018: 8). Meenutagem, et võrreldes Tallinna või Tartuga oli Riia tol perioodil rikas ja kiiresti arenev linn.

Värskest iseseisvunud Eestis tuli varasema tsaaririigi seaduste asemel välja töötada omad ja kohalikele oludele sobivamad ning korraga rajada nii riiklikke kui kohalikke geodeetilisi võrke. Tööde taustal ühelt poolt maareform ja vajadus katastrimõõdistamise järele ja teisalt hoogustuv linnastumine ja üha paisuv ehitustegevus linnades. Ewald Pajos annab 1938. aasta ajakirjas „Geodeet“ ülevaate linnamaamõõtja tegevusaladest, puudutades muu hulgas asulate alusvõrkude temaatikat. Artikli ilmumise hetkeks olid üksikud linnad saanud geodeetilise alusvõrgu Põllutööministeeriumi kaasabil ja osades oli võrk olemas varasemast perioodist. Siiski oli osa asulaid alusvõrguta või sellise alusvõrguga, millisele detailmõõtmisi rajada ei saanud. Osad Põllutööministeeriumiga koostöös rajatud võrgud olid lülitatud üleriigilisse geodeetilisse võrku, teised veel mitte. Pajos rõhutab, et geodeetilise alusvõrgu loomine on asulale esmajärgulise tähtsusega ülesanne. Iga suurema ulatusega mõõtmistöö tuleks linnades edasi lükata seni kui alusvõrgud loodud. (Pajos 1938: 34–35)

Toon allpool ära lõigu, kus toodud täpsed soovitusel asula geodeetilise võrgu rajamiseks:

*Põllutööministeerium annab trigonomeetrilise ja kõrgetäpsusega kõrgusevõrgu punkte lähemate aastate vältel. Asulail, kus lähimail aastail suuremas ulatuses mõõtmisi ette näha, tuleks kohe hoolitseda geodeetilise aluse loomise eest. Kui trigonomeetriline võrk veel puudu, tuleb pöörduda põllutööministeeriumi poole palvega selle loomiseks väljaspool järjekorda. Kus trigonomeetriline võrk loodud, võetagu polügonomeetriliste võrkude loomine juba eeltuleva suve töökavva, selleks vajalikke eeldusi luues kohe krediitide hankimisel ja eeltöödele asumise teel. Polügonomeetrilise võrgu märkide ja nende asetamise kohta koostatagu kavandid ja esitatagu kinnitamiseks. Järgnevalt tuleb asuda märkide valmistamisele, et välistöö algul töös takistusi ei tekiks. Märkide materjal ja kuju olgu kooskõlas vajaduste ja kohalike võimalustega – mis ühele asulale sobiv ja kohane, on teisele üleliigne või teostamata. Märkide arvu tingib asula maa-ala pindala, kuju, reljeef, ehitatud osa pindala, asetus ja tänavate võrgu tihedus. Märkide vahekaugused linnas võetakse üldiselt nii tihedalt, et mõõtmist tarviliku täpsusega võrgu alusel võib teostada täisehitatud suurema liiklusega kohtadel tihedamini kui ehitamata maa-aladel. Märgid olgu püsivad ja kergesti kättesaadavad (Pajos 1938: 34–35).*



1935. aastal jõustunud Maamõõte seadus puudutab alusvõrkude teemat üsna põgusalt. Maamõõte seaduse elluviimise määrus ja juhatuskiri aastast 1936 sisaldab seevastu täpseid võrgutööde juhiseid. Määruse kolmas osa on pühendatud geodeetilise aluse töödele ja selles on toodud täpsed nõuded kolmnurgavõrkude, polügonomeetriavõrkude ja kõrgusvõrgu tööde teostamiseks. Polügonomeetrilise võrgu ülesandeks oli tihendada trigonomeetrilist võrku, andes suurema arvu kindlaid toetuspunkte sidekäikudele ja mõõtmiste võrkudele. Polügonomeetria-võrgud jaotusid I ja II järku. I järgu punktid olid seotud kolmnurkvõrgu punktidega ja II järgu käigud mõõdeti I järgu punktide vahele. Punktide tsentritena soovitati võimalusel kasutada olemasolevaid piirimärke (piirikive).

Määrus on kõikidele huvilistele digitaalarhiivis Digar kättesaadav. Toon siiski väikse stiilinäite, millise detailsuse astmega määrus reguleeris käikude planeerimist:

*Polügonomeetrilise võrgu käigud valitakse nii, et nad võimalikult sirgekujuselt ühendaks kaht kolmnurga või antud polügonomeetrilise võrgu punkte, s.t. et murdenurgad oleks võimalikult 180° lähedal. Polügonomeetrilise võrgu käikude joonte pikkused olgu võimalikult võrdsed, keskmise pikkusega I ja II järgus — 600 m. Naabruses oleva lühema ja pikema joone vahekord ei või olla väiksem, kui 1:2 I järgu käikudel ja 1:3 II järgu käikudel.*

*On kahte trigonomeetrilise võrgu punkti ühendava I järgu polügonomeetrilise käigu pikkus suurem kui 6 km või on käigu joonte arv rohkem kui 20, määratakse teiste polügonomeetriliste käikude abil sõlmpunkt või, võimaluse korral, tehakse täieline kaudne side nii, et sõlmpunktist või kaudselt seotud punktist trigonomeetrilise võrgu punktini olev käigu pikkus ei ületaks 6 km ja joonte arv ei oleks üle 20. II järgu polügonomeetriliste käikude pikkus ei või ületada 4 km ja joonte arv 20. (Maamõõte seaduse elluviimise määrus ja juhatuskiri 1936, § 55,56)*

Samasugused detailsed nõuded on toodud mõõtmis- ja arvutusmeetodite, väliraamatute pidamise korra jne kohta.

Kohalike võrkude rajamine, mis Eesti Vabariigi esimese iseseisvusperioodi jooksul lõpule ei jõudnudki, jätkus peale II maailmasõda. Taasiseseisvunud vabariik sai päranduseks kohalikud võrgud, mis olid kas Pulkovo 1942. aasta või kohalikus süsteemis (Kohalik geodeetiline võrk 2020). Kokku oli Eestis kasutusel umbes 160 erinevat kohalikku süsteemi (Kuuler 2018: 15) ja nagu allpool näha, on nendele koordinaatide transformeerimisparameetreid kohalikust süsteemist riiklikku süsteemi üleminekuks leitud mitmetes üliõpilastöödes. Linnade ja asulate kohalikud geodeetilised süsteemid ei iseloomustanud ainult Nõukogude Liitu, kus kohainfo oli

osaliselt salastatud ja kohalike võrkude riikliku võrguga sidumine polnudki eesmärgiks, vaid ka läänერიike. Näiteks Helsingi läks kohalikult süsteemilt üle riiklikule ETRS-GK25 koordinaatide- ja N2000 kõrgussüsteemile alles 2012. aastal (Helsingin kaupunki). Aastal 2009 on Metropolia rakenduskõrgkoolis kaitstud bakalaureusetöö Kerava linna kohaliku võrgu saneerimise ja transformeerimisparameetrite arvutamise kohta (Piirainen 2009).

Taasiseseisvunud Eestis asuti kohalikke geodeetilisi võrke rekonstrueerima. Enamasti leiab nende tööde kohta infot nn hallist kirjandusest: geodeetiliste tööde aruannetest. Tartu linna geodeetilise põhivõrgu rekonstrueerimist aastatel 2005–2006 kirjeldatakse kokkuvõtvalt ajakirjas „Geodeet“ ilmunud artiklis (Laos ja Müller 2006). Artikkel annab ülevaate võrgu seisukorrast enne rekonstrueerimist, toona oli aastatel 1980–1981 rajatud võrgu märkidest säilinud 66%, rikutud oli 3% märke ja leidmatuks jäi või hävinud oli 31% märke. Säilinute hulgas oli märkimisväärselt palju seinamärke, mis alati rajatakse komplektina, selle arvesse võtmine vähendanuks säilinud märkide osakaalu veelgi. Autorid osutavad, et 20 aastat ongi loomulik periood põhivõrkude järjekordseks rekonstrueerimiseks.

KGV temaatikale on keskendunud mitmed Eesti kõrgkoolides kaitstud üliõpilastööd. Tallinna Tehnikaülikoolis on viimase paarikümne aasta jooksul kaitstud järgmised bakalaureusetööd: „Kohaliku geodeetilise põhivõrgu eelarvutused” (Salumaa 2003), „Elektro-optilise kaugusmõõtja kalibreerimistulemuste ja mõõtmisandmete redutseerimise vajalikkus kohalike geodeetiliste põhivõrkude tasandamiseks” (Kõiva 2003), „Polügonomeetria mõõtmiste täpsustest kohalike plaaniliste geodeetiliste põhivõrkude rekonstrueerimisel ja rajamisel” (Vahuri 2004). Kaitstud on ka üks magistritöö: „Tallinna kohaliku koordinaatide süsteemi ja Lambert-Est koordinaatide süsteemi sidemest” (Taru 2000). Eesti Maaülikoolis on selles valdkonnas magistritöid kaitstud kolm: „Tartu kohaliku geodeetilise võrgu ajalooline ülevaade” (Dun 2013), „Tallinna kesklinna piirkonna reeperite vajumine 2000 ja 2008 nivelleerimisandmete põhjal” (Ojamäe 2010), „Tartu linna geodeetilise põhivõrgu 2. ja 3. järgu täpsuse hindamine” (Pertmann 2007). KGV teemat uurivad ka arvukad bakalaureusetööd: „Torma alevi kohaliku geodeetilise põhivõrgu rekonstrueerimine” (Kuuler 2018), „Vigala valla kohaliku geodeetilise põhivõrgu ülevaade ja rekonstrueerimise vajaduse hindamine” (Liländer 2015), „Geodeetilise mõõdistusvõrgu koostasandus programmiga GEO 2003” (Pertmann 2004), „Võru linna kohaliku geodeetilise põhivõrgu rekonstrueerimine” (Taaber 2002), „Kuressaare

linna kohaliku põhivõrgu rekonstrueerimise projekt“ (Turk 2002), „Tartu linna 1. järgu polügonomeetria võrgu tasandamine L-EST92 süsteemis“ (Orlov 2001), „Tõrva linna geodeetilise võrgu rekonstrueerimine ja L-ES92 süsteemi transformeerimine“ (Põder 2000), „Tartu kohaliku geodeetilise süsteemi teisendamine riigi geodeetilisse süsteemi L-Est92“ (Tõnisson 2000).

Tartu KGV on vaatluse all Pertmanni (2007) magisritöös. Pertmann hindas Taru linna KGV täpsust ja leidis, et 93% kontrollitud punktidest on mõõdetud nõutava 2 cm täpsusega lähtepunktide suhtes. Pertmanni (2003) bakalaureusetööst leiab praktilisi juhtnööre KGV mõõtmistulemuste tasandamiseks programmiga SBG Geo, mida ka mina oma magisritöös tasandusarvutuste tegemiseks kasutan.

Dun (2013) tegi Tartu KGV 2. järgu Tähtvere piirkonna punktidel ka RTK mõõtmisi ja jõudis järeldusele, et see meetod KGV punktidele koordinaatide määramiseks ei sobi. Nõutav täpsus saavutati ainult soodsatel tingimustel, milleks on: avatud horisont, sobiv kellaaeg, asukoht ja rohke satelliitide arv ning nende paiknemine üksteise suhtes (PDOP). RTK mõõtmiste täpsust on hiljem põhjalikult uuritud mitmes Eesti Maaülikoolis kaitstud bakalaureuse- või magisritöös (nt Uusmaa 2019, Kõre 2018, Rosenberg 2018, Svežova 2018, Kirs 2017).

## 2.4. Kohaliku geodeetilise võrgu rajamist ja rekonstrueerimist puudutav seadusandlus Eestis ja naaberriikides

Nagu eelpool mainitud, reguleerib Eestis geodeetiliste märkidega seonduvat Ruumiandmete seadus (RAS) ning keskkonnaministri määrus „Geodeetiliste tööde tegemise ja geodeetilise märgi tähistamise kord, geodeetilise märgi kaitsevööndi ulatus ning kaitsevööndis tegutsemiseks loa taotlemise kord” ; edaspidi *Geodeetiliste tööde kord*). KGV tööde tegijaile on kõige olulisemaks dokumendiks Maa-ameti peadirektori käskkiri „Kohaliku geodeetilise võrgu rajamise ja rekonstrueerimise juhend” (edaspidi *Maa-ameti juhend*), mille hetkel kehtiv versioon on 30. aprillist 2018. aastast (Kohaliku... 2018). Üsna sarnasena on see juhend püsinud alates 2000. aastate algusest.

Aastal 2001 lõpetati Eesti mandriosas ja Lääne-Eesti saartel riigi tihendusvõrgu rajamine. Sellega realiseeriti riigi ristkoordinaatide süsteem L-EST97 hajaasustusega aladel. Võrkude uuendamise järgmiseks etapiks sai asulate kohalike võrkude rekonstrueerimine ja rajamine, milleks Maa-amet korraldas riigihanked ja nende läbi viimiseks koostas vastava juhendi. Maa-ameti riigihanke “Asulate plaaniliste geodeetiliste põhivõrkude rekonstrueerimine ja rajamine” Lisa 1, mis sellest ajast pärit, on ära toodud Kuuleri (2018) bakalaureusetöös, samuti on nõuded toodud Randjärve (2002: 31–32) õpikus. Mõõtmismetoodika osas mingeid uuendusi võrreldes tollase juhendiga praegu Maa-ameti kodulehel kättesaadavas juhendis sisse viidud ei ole.

Juhendi kohaselt on peamine meetod KGV puhul polügonomeetria. KGV lähtepunktideks on riikliku võrgu (I, II klass või tihendusvõrk) ning kui neid ei ole piisavalt, tuleb staatilise GNSS mõõtmise abil rajada KGV 1. järgu punktid, misjärel võrku tihendatakse 2. järgu punktidega polügonomeetria meetodil. 2. järgu punktide rajamist GNSS meetodiga juhend ette ei näe, küll aga on selline võimalus ette nähtud Geodeetiliste tööde korras (§ 6 lõige 2).

Üksikute punktide teisaldamise kohta tuleb juhiseid otsida samuti sellest määrusest:

*Geodeetilise märgi teisaldamine on märgi kõrvaldamine selle asukohast ning teise asukohta uue geodeetilise märgi paigaldamine, tehes vajalikud ülevaatus-, projekteerimis-, ehitus-, mõõtmis- ja arvutustööd.*

*Geodeetilise märgi teisaldamisel tuleb säilitada selle senine klass või järk, kui geodeetilise märgi omanik kooskõlastatult Maa-ametiga ei ole sätestanud teisiti.*

*Geodeetilise märgi teisaldamisel tehtavatel mõõtmistöödel kasutatakse:*

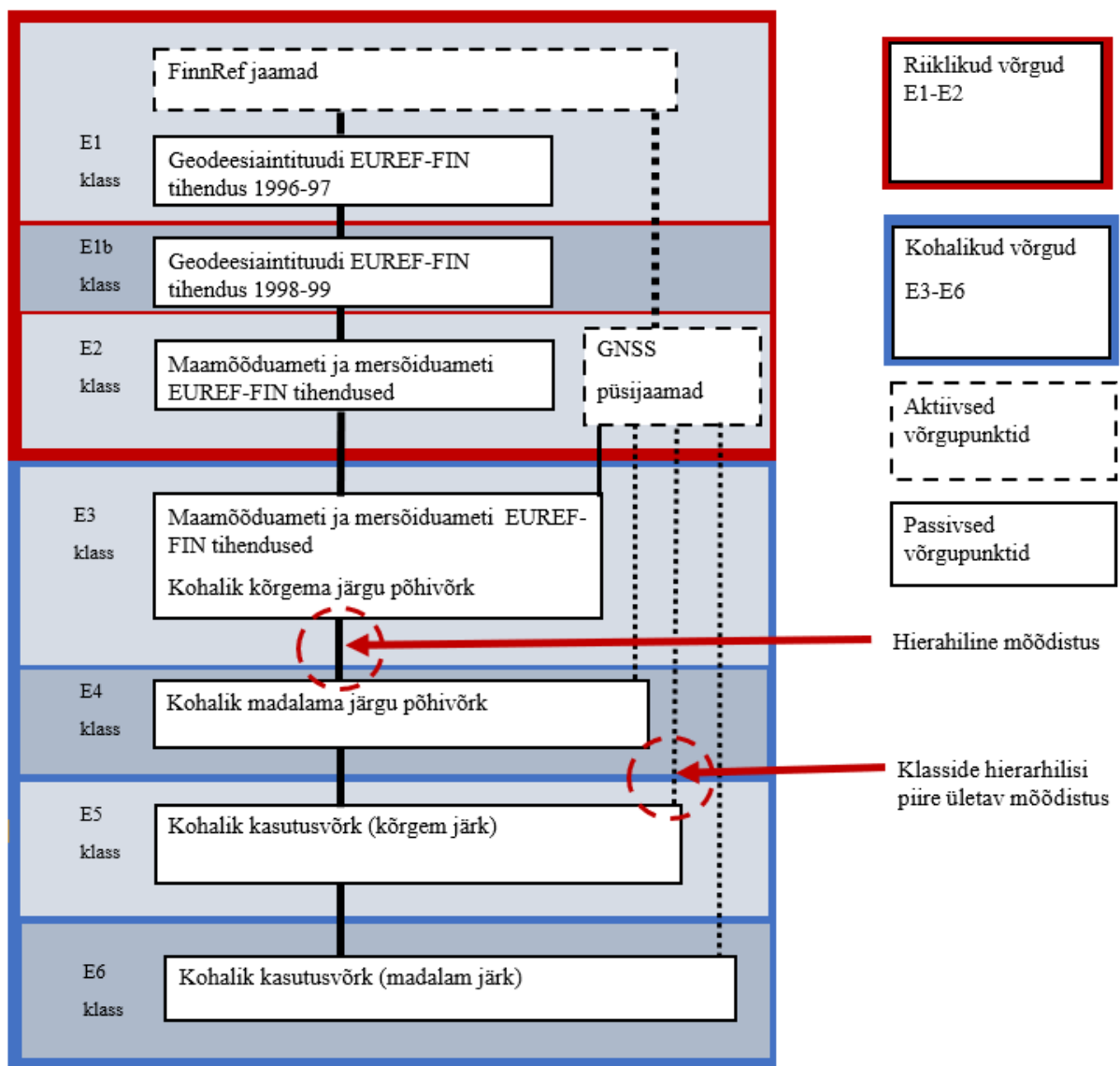
- 1) riikliku geodeetilise võrgu märgi ning kohaliku geodeetilise võrgu 1. järgu märgi korral staatilist suhtelist GNSS tehnoloogiat;*
- 2) kohaliku geodeetilise võrgu 2. järgu märgi korral polügonomeetriaat või staatilist suhtelist GNSS tehnoloogiat ja trigonomeetrilist või geomeetrilist nivelleerimist;*
- 3) kõrgusvõrgu märgi korral geomeetrilist nivelleerimist (Geodeetiliste tööde... § 9 lõiked 2–4).*

Nii Geodeetiliste tööde kord kui RAS reguleerivad geodeetilise märgi kaitsevööndis tegevuse korraldamist ja määruks sätetatakse vööndi ulatus (pinnases asuvate KGV märkide puhul 3 m märgi keskmest, ehitisse paigaldatud märgi puhul 0,5 m ehitise pinnast horisontaalsuunas ja 3,2 m märgi keskmest vertikaalsuunas) ning vajadus kaitsevööndis tegutsemiseks vastav luba taotleda (Geodeetiliste tööde... § 18). Ei RAS ega ministri määrus ei puuduta kontrollmõõtmiste teemat, rääkimata nende metoodikast. Kuna märgi vööndis tööde tegemiseks tuleb taotlus esitada märgi omanikule (KGV puhul kohalik omavalitsus), siis senise praktika kohaselt KGV omanik annab vastava loa tingimusel, et tööde lõpetades teostatakse märgi kontroll.

Mitte kuskil ei ole sätetatud, et kontrollmõõtmisele või ka üksikute punktide teisaldamisele kehtiks teistsugused reeglid polügonomeetriaatmõõtmiste ja staatilise GNSS mõõtmise osas kui võrgu rekonstrueerimisel. See tähendab, et ka üheainsa punkti mõõtmisel kehtib nõue siduda polügonomeetriaatkäik vähemalt kahe kõrgema järgu punktiga. Kala jt (2015: 83) leiavad, et tänapäeval ei ole polügonomeetriaatkäigu rajamisel sellist sidumist sageli võimalik teha, sest 1) GPS-meetodil rajatud lähtepunktidel võib puududa nähtavus naaberpunktile ning 2) käigu alguse ja lõpu piirkonnas võivad kõrgema järgu punktid sootuks puududa. Autorid pakuvad välja lähtepunktide analüütilise leidmise mitmekordse otselõike abil (vähemalt kolmelt punktilt), mitmekordse vastulõike abil (vähemalt neljale punktile) või nurgalis-joonelise lõikega vähemalt kolmele punktile (samas). Seadused-määrused neid võimalusi ette ei näe.

**Soomes** reguleerivad geodeetiliste võrkude mõõtmisega seotud küsimusi JUHTA (*Julkisen hallinnon tietohallinnon neovottelukunta* – avaliku halduse infohalduse nõukoda) poolt välja töötatud juhised „JHS 184. Kiintopistemittaus EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä” (Geodeetiliste punktide mõõtmine EUREF-FIN-koordinaatsüsteemis) (JHS 184: 2017;). Soovituste praegu kehtiv versioon on aastast 2017. Soome geodeetilised võrgud jaotuvad riiklikeks (E1 ja E2 klass) ja kohalikeks (E3, E4, E5 ja E6 klassid). Laia laastus vastab E4 meie

KGV 1. järgu võrgule, E5 KGV 2. järgule ja E6, millesse kuuluvad transformeerimise teel saadud koordinaatidega punktid või abipunktid, meie KGV 3. järgule.



**Joonis 2.** Võrgu hierariat järgivad ja klasside hierarhilisi piire ületavad mõõtmised Soome geodeetilistes võrkudes (joonis: JHS 184 2017: 6)

Soome juhendis on E5 ja E6 klassi punktide mõõtmiseks ja kontrollimiseks välja pakutud erinevaid meetodeid. Neid võib mõõta staatilise GNSS mõõtmise abil, reaalaaja GNSS mõõtmisega (ühe baasjaamaga seotud RTK või võrgu RTK, aga siiski ainult teatud tingimustel) ja tahhümeetriselt kas üksiku käiguna või võrguna (JHS 184 2017: 18 jj). Juhendis on eraldi lõik pühendatud üksikute hävinud punktide asendamisele ja võrgu saneerimisele. Käsitletakse

ka juhust, kui olemasolevad punktid võrgus enam omavahel kokku ei sobi ja seetõttu on neile vaja mõõta ja arvutada uued koordinaadid (samas: 23).

Soome nõuded on äärmiselt detailsed ja need on esitatud väga ülevaatlikult tabelite kujul. Võrreldes Eestiga torkab silma see, et püsijaamade andmete kasutamine on tavaline praktika E5 ja E6 klassi punktide mõõtmisel. Soomes teadvustati, et võrgutööde jaoks uute nõuete välja töötamisel ei saa jätta tähelepanuta uusi mõõtmismeetodeid ja üha kasvavat GNSS püsijaamade võrku (Häkli 2014). See tähendab, et võrreldes varasemaga on praegu aktsepteeritavad ka mõõtmised, mis ei järgi võrkude traditsioonilist hierarhiat (samas, vt joonis 2).

**Lätis** võeti 2012. aastal vastu kohaliku geodeetilise võrgu regulatsioonid (Vietējā ģeodēziskā tīkla noteikumi), mis täiendavad ja täpsustavad nende 2010. aastast pärit ruumiandmete seadust (Ģeotelpiskās informācijas likums). Ruumiandmete seaduse kohaselt jagunevad Läti geodeetilised võrgud riiklikeks ja kohalikeks võrkudes ning kohalike võrkude paigaldamise, hooldamise ja kaitse eest vastutab kohalik omavalitsus. Kohalike võrkude hulka kuuluvad kõrgusvõrgu märgid (klassid N3 ja N4), plaanilise võrgu klass G3 (riiklikud on G0, G1, G2), polügonomeetripunktid, triangulatsioonipunktid „ja muud püsivad geodeetilised punktid“. Näib, et alates regulatsioonide vastu võtmisest on kohalike geodeetiliste võrkude seisukorra hindamise ja parandamisega aktiivselt tegeletud mitmetes kohalikes omavalitsustes ja tööd jätkuvad (Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra 2020). Siiski on paar aastat tagasi ilmunud artikkel, milles hinnatakse Riia ajaloolise KGV seisukorda, antud juhul selle kasutamisest geodeetistel töodel täielikult loobuda vähemalt seniks, kuni võrku pole rekonstrueeritud. Riia kohaliku passiivse geodeetilisest punktidest koosneva võrgu koordinaatide ebatäpsus riikliku LatPos GNSS-püsijaamade võrgu suhtes on kuni 15 cm (Celms jt 2018).

Geodeetiliste tööde tegemiseks Riia linnas soovitatakse riikliku koordinaatsüsteemiga sidumiseks RTK tehnoloogiat. Piirkondades, kus võrk on hiljaaegu rekonstrueeritud, on kohustuslik kasutada KGV punkte juhul, kui need jäävad mõõdetava objekti vahetusse lähedusse (kuni 200 m kaugusele). Linna võrku ei rekonstrueerita tervikuna vaid osade kaupa. RTK mõõtmistel on võimalik kasutada riiklikku LatPos püsijaamade võrku. Riia linnal on aga ka oma, viiest GNSS püsijaamast koosnev võrk EUPOS-RIGA, mis on oluline osa kohalikust geodeetilisest võrgust. Piirkondades, kus traditsioonilist geodeetiliste märkidega kindlustatud

võrku pole plaanis rekonstrueerida või rajada, jääbki see ainsaks kasutatavaks kohalikuks võrguks. Artiklis vaadeldi ka RTK koordinaatide erinevusi LatPos ja EUPOS-RIGA võrkudes ning 84% juhtudest jäi see alla 2 cm. (Celms jt 2018, Rigas Dome 2021)

GNSS püsijaamad võivad olla osaks kohalikust võrgust ka Soomes – seal võivad püsijaamad kuuluda nii riiklike kui kohalike võrkude hulka ja neile klassi määramisel võetakse arvesse võrgu üldist suurust, püsijaama kindlustatust jne (JHS 184 2017:9).

**Rootsis** eelistatakse mõõtmiste plaanilise ja kõrgusliku täpsuse suurendamiseks samuti arendada püsijaamade võrke ja loobutud on juba riiklike geodeetiliste võrkude kindlustatud punktide hooldamisest varasemas mahus. Engelberg jt ülevaate kohaselt arvatakse kogu Rootsi peale piisavaks 300 kindlustatud geodeetilist märki, mille regulaarne ülemõõtmine aitab täpsustada ka püsijaamade võrgu olukorda ja geodünaamilisi liikumisi. Muus osas geodeetilisi märke kui selliseid vajalikuks ei peeta, sest RTK tehnoloogia on niivõrd täpne. Kõrgusvõrk koos gravimeetriliste andmetega oma rolli minetanud pole ja kõrgusreeperite alalhoidmisest loobutud ei ole. Autorid juhivad tähelepanu asjaoluline, et kui plaaniliselt on GNSS mõõtmis seotud riikliku geodeetilise süsteemiga, siis kõrgused saadakse mitte kohalikus uues kõrgussüsteemis, RH 2000 vaid ellipsoidi kõrgustena. Siiski ei välistata tolles kümne aasta taguses artiklis, et kui Rootsi geoidi mudel piisvalt täpsustub, võidakse ka see põhimõte üle vaadata (Engeberg jt 2010) .

Rootsi Maa-ameti (Lantmäteriet) 2019. aasta tegevuse ülevaates rõhutatakse nivelleerimise tähtsust jätkuvalt. Aruandes on juttu sellest, et vaja on senisest veel enam GNSS tugijaamu, mis oleks endale kõrguse saanud loodimise, mitte GNSS tehnoloogia abil. Riikliku geodeetilise süsteemi strateegia on aktiivne referentsraamistik, mida realiseeritakse SWEPOS püsijaamade abil ja seetõttu tuleb kehtivas geodeetilises süsteemis mõõtmiseks kasutada püsijaamade (riiklike või kommertslike, ka viimastele arvutab parandid Lantämteriet) andmeid. Alates 2005. aastast kasutusele võetud kõrgussüsteem RH2000 on passiivne ja baseerub ligikaudu 50 000 punktil, mis on kolmanda kõrgtäpse nivelleerimiskamapaaniaga mõõdistatud. Nende punktide kaitsmine ja hooldus on jätkuvalt olulised ja aktiivne referentsraamistik kõrguste jaoks, mis koosneks GNSS püsijaamadest, ellipsoidi kõrgustest ja geoidi mudelist, lähituleviku plaanide hulgas ei ole. Paljud kohalikud omavalitsused on uuele kõrgussüsteemile üleminekuga seoses oma kõrgusvõrgu üle loodinud (Alfredsson jt 2019).



### **3. MÕÕTMISVAHENDID JA MEETODID. JÄRELTÖÖTLUSTARKVARA**

Magistritöö praktilise osana esitlen kahe Tartu linnas asuva geodeetilise märgi teisaldamisega, ühe teisaldatava märgi staatilise GNSS mõõtmise ja ühe märgi kontrollimisega kaasnenud mõõtmiste ja tasandusarvutuste tulemusi. Teisaldatavates punktideks olid Tartu linna geodeetilise võrgu teise järgu punktid nr 10064 (uus number 20064), nr 10087 (uus number 20087), nr 10051 (uus number 20051) ja kontrollitavaks punkt nr 100031.

Uurisin, kuidas oleks selliseid töid kõige efektiivsem teha, võrdlesin kulunud aega ja saadud täpsushinnanguid. Selleks tegin reaalelulises situatsioonis läbi erinevad mõõtmised: tahhümeetriline, sh erinevate võrgu konfiguratsioonidega, staatiline GNSS mõõtmine ja võrgu RTK mõõtmine teisaldatud punktil ning võrgu RTK abil mõõdetud kindelpunktidele või olemasolevatelt KGV punktidele vastulõigete meetodil koordinaatide määramine teisaldatud punktile.

Geodeetiliste tööde korras (§ 4 lõige 1) loetletakse geodeetilise töö etapid:

- 1) olemasolevate geodeetiliste märkide ülevaatus;
- 2) projekteerimine;
- 3) ehitustööd;
- 4) mõõtmistööd;
- 5) arvutustööd.

Ka üksikute geodeetiliste märkide teisaldamisel ja kontrollmõõtmistel kulub lõviosa aega hoopis ettevalmistavatele tegevustele – olemasolevate geodeetiliste märkide ülevaatus ja töö projekt võivad kordades rohkem aega võtta kui mõõtmised. Põhjalikult ja hästi tehtud ettevalmistustööd tagavad selle, et välimõõtmine, ükskõik mis meetodil seda läbi viiakse, kulgeb võimalikult kiiresti ja tõrgeteta.

### 3.1. Kasutatud töövahendid

Polügonomeetriakäikude mõõtmiseks kasutati järgmisi OÜ WeW töövahendeid:

- Leica elektrontahhümeeter TS16 I 1" R1000 (Eq.nr.7136426, nurgaline täpsus 1", jooneline täpsus 1mm+1,5ppm (1,5mm/km));
- Tahhümeetri tarkvara Leica Captivate ja väliarvuti Leica CS20;
- 5 Nedo puitstatiivi;
- 5 Leica treegerit GDF322;
- 4 Leica prismat GPR1 koos prisma adapteriga GRT144;
- Digitalne ilmajaam Skywatch BL400. Mõõdab õhuniiskust, õhutemperatuuri ja õhurõhku 0,1 ühiku täpsusega, kalibreeritud Metrosert 24.08.2020.

Staatiliseks GNSS mõõtmiseks kasutati Eesti Maaülikooli vahendeid:

- GNSS seade Trimble R4-3 (2tk);
- väliarvuti Trimble TCU ja tarkvara Trimble Access;
- 2 Trimble Tri-Max statiivi;
- Leica GDF322 optilise tsentriiriga treegerit, mis eelnevalt kontrolliti ja justeeriti.

RTK-mõõtmised kasutati OÜ WeW varustust:

- Leica GS18T ja väliarvuti CS20 Captivate tarkvaraga;
- Leica süsinikkiust sau GLS31 (Leica Proffesional 5000 seeria sau täpseteks mõõtmisteks) ning sauahoidjat GST6.

Kombineeritud mõõtmiseks kasutati

- Leica Viva NetRover GS08 ja väliarvuti CS15 Viva SmartWorx tarkvaraga;

Võrgu RTK mõõtmisel oli GNSS seade kas Nedo puitstatiivil või kasutati Leica süsinikkiust sau GLS31 (Leica Proffesional 5000 seeria sau täpseteks mõõtmisteks) ning sauahoidjat GST6.

Kõik kasutatud GNSS seadmed olid kahesageduslikud (L1 ja L2) ja võimaldasid kasutada nii GPS kui GLONASS süsteemi satelliite. OÜ WeW seadmed töötavad HadNet RTK võrgus.

### 3.2. Polügonomeetriamõõtmine

KGV 2. järgu punktide koordineerimiseks kõige traditsioonilisem ja laialdaselt kasutatavam viis on polügonomeetriakäikude mõõtmine elektrontahhümeetriga. Selliselt mõõdetud punkti asendi oodatav viga sõltub paljudest teguritest, sealhulgas lähtepunktide koordinaatide täpsus, nurkade ja joonte mõõtmise täpsus, joonte pikkus, nurkade arv ja lõikenurga suurus (Randjärv 2002: 47). Lähtepunktide suurema arvu korral saadakse täpsemad tulemused ja eelistada tuleks sõlmpunktidega käikude süsteeme ja mitmekordseid lõikeid (samas). Magistritöös võrdlen saavutatud täpsusi erinevate käigu konfiguratsioonide korral, kasutades lihtsat lahtist polügonomeetriakäiku ja sõlmpunktiga käikude süsteeme.

Mõõdeti kolme statiivi meetodil, millega vähendatakse tsentreerimis- ja reduktsioonivea mõju (Kala jt 2015: 42). Selle meetodi korral tõstetakse edasi viimane statiiv, millele on juba mõõtmised tehtud. Teised kaks statiivi jäävad paigale ning nende juures tõstetakse ümber ainult aparaat ja prisma. Ümbertõstmisel tuleb olla väga hoolikas, et statiive mitte paigast nihutada. Peale ümbertõstmist võib seadmeid vajadusel loodida, kuid tsentreerimise täpsustust ei tehta (samas).

Maa-ameti juhendi (Kohaliku... 2018:7) kohaselt tuleb polügonomeetriakäigud mõõta tahhümeetritega, mis vastavad järgmisetele nõuetele:

- nurga mõõtmise täpsus  $\geq \pm 1,5''$
- kauguse mõõtmise täpsus  $\geq \pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D \text{ km})$ .

Kõik nurgad tuleb mõõta kolme täisvõttega ja jooned iga nurga mõõtmisega koos. Magistritöö mõõtmistes jaoks tehti täisvõtteid vähemalt neli. Mõõdistamiseks kasutati Leica *Captive* tarkvara käigumõõtmisprogrammi *Traverse*. Peale esimese poolvõtte mõõtmist kõikidele soovitud suundadele toimub edasine automaatselt. Instrumenti saab sisestada tolerantsid – missugused võivad olla suunaamõõtmise erinevused poolvõtete vahel ühes täisvõttes ja erinevate täisvõtete vahel. Piiriks pakkus instrumendi tarkvara vaikimisi  $3''$  ja seda ei muudetud. Mõnel juhul osutus sellise täpsuse saavutamine keeruliseks ja tulemus salvestati väiksema

täpsusega. Kui see oli suurem või võrdne 6", siis mõõtmiste arvu jaamas kahekordistati.<sup>1</sup> Kala jt (2015: 32) soovivad mõõtmist jaamas korrata, täpsustamata, kas esimese mõõtmise tulemused tuleks kõrvale jätta. Praktikas on see Leica käigumõõtmise programmis keeruline, palju lihtsam on täisvõtteid lihtsalt lisada ja kokkusobimatud mõõtmised järelöötluses eemaldada. Maa-ameti juhend poolvõtete erinevuse või kahe täisvõtte erinevuse osas ettekirjutusi ei tee, Kala jt (samas) "Kõrgema geodeesia" õpikus on vastavad arvud küll toodud (tabel 1), aga mitte KGV mõõtmistega seoses.

**Tabel 2.** Soovitavad täpsusnõudumised nurgamõõtmisele (Kala jt 2015: 32).

Tolerantsi nimetus	Kuni 2" teodoliit	3" teodoliit
Erinevus täisvõtete vahel	6"	8"
Erinevus poolvõtete vahel (2C)	12"	12"
Algsuuna sulgemisviga	6"	8"
Nullile taandatud suundade erinevused üksikutes täisvõttes	6"	8"
2C maksimaalne erinevus täisvõttes	12"	12"
Üksikutest nurkadest saadud seniitkauguste (vertikaalnurkade) ja nulliasendi erinevused	15"	15"

Eestis on reguleeritud ainult lõpptulemuse nõutav täpsus – KGV 2. järgu punktidel on see  $\pm 2$  cm lähtepunktide suhtes ja juhendis on ära toodud vaid see, et polügonomeetriakäikude tasandamiseks kasutatav tarkvara peab võimaldama otsest võrdlust nõuetega. Mõõtmiste korraldamise tehnilisi nüansse (kui pikk võib olla polügonomeetriakäik, mitu uut punkti võib lähtepunktide vahele rajada, missugused on lubatud hälbed nurga või joonepikkuse mõõtmisel, milline peab olema tsentreerimise- ja instrumendi ning prisma kõrguse mõõtmise täpsus) määratletud ei ole. Kõige detailsemad on vastavad nõuded Soome juhendis (vt JHS 184: 2017), aga nurga- ja joonemõõtmise standardhälbed on toodud ka Läti regulatsioonides (Vietēja ģeodēziskā tīkla noteikumi IV: 41). Eri maade nõuete võrdluse panin kokku tabelitesse lisas 1.

<sup>1</sup> Boonusena ununes kahekordistatud mõõtmiste arv enamasti seadetes ja enamikes käikudes on seetõttu küllaga liigmõõtmisi – kuna käiguprogrammiga täisvõtete mõõtmine on kiire ja mugav, ei lisanud see erilist ajakulu, enamus aega kulub tööprotsessis statiivide-prismade ja instrumendi paikaseadmisele. Samas tuleb arvestada, et korduste arvu suur tõstmine pole efektiivne, kuna ei elimineeri süstemaatilisi vigu (Kala 2009:92).

Maa-ameti juhend (Kohaliku.. 2018: 7) ütleb, et valguskaugusmõõturid tuleb kalibreerida enne ja pärast välitöid (joonis 3). Vahemaade mõõtmise käigus tuleb mõõta õhutemperatuur ja õhurõhk. Ka kasutatud termo- ja baromeetrid tuleb kalibreerida enne ja pärast välitöid. OÜ WeW-ile kuuluvat Leica tahhümeetrit TS16 I 1" R1000 kalibreeriti Vääna-Jõesuu polügoonil 28.07.2020. Magistritöö valmimise ajaks kalibreerimistulemused ja polügoonil määratud prisma konstandid veel teada pole.

Kuigi üheski juhendis ega määruses pole seda ära toodud, on Eestis üldiselt polügonomeetria mõõtmisel tavaks parandeid (ilmastiku ja projektsiooniparand, prisma konstant) instrumenti mõõtmise ajal mitte sisestada vaid teha seda järeltöötluse käigus. Niimoodi välditakse olukorda, et parandeid saab topelt. Soome juhendis on see nõue sõnastatud. Kui mõõdetud joone erinevates otstes on tingimused väga erinevad (instrument varjus, prisma kuumas asfaldi kohal päikeses), ei piisa ainult instrumendi juures mõõdetud temperatuurist vaid vastav väärtus tuleks mõõta ka joone teises otsas ja järeltöötlusandmetesse lisada vastava joone keskmine temperatuur (Kala jt 2015: 59). Ilmastiku parandite puhul tuleb silmas pidada, et need pole universaalsed vaid saadakse iga konkreetse instrumendi juhendis antud valemi abil (samas: 50). Järeltöötlustarkvaras SBG Geo on levinumate tahhümeetrite vastavad andmed olemas, vajadusel saab need sisestada ka käsitsi.



**Joonis 3.** Valguskaugusmõõduri kalibreerimine ja prisma konstandi määramine Vääna-Jõesuu polügoonil. Ilmajaamad on mõõdetava joone mõlemas otsas.

Prisma konstant tuleks samuti andmetele lisada järeltöötluse käigus, aga Leica tahhümeetril kasutava tarkvara tõttu tuleb seejuures olla tähelepanelik. Leica on tarkvaraliselt seadistatud joonemõõtmisel kasutama “Leica konstanti”, milleks on -34,4 mm ja kõik teised konstandid arvutatakse selle väärtuse kaudu (vt tabel 3). Ükskõik, missugune konstant mõõtmisel valida ja kas seadistada instrument mõõtma kald- või horisontaalkaugusi, eksporditakse gsi formaadis

kaldkaugusi (Leica Captivate Technical Reference Manual. Version 3.0. English: 211–212), mis on eelnevalt parandatud väärtusega -34,4 mm.

**Tabel 3.** Leica konstandid ja absoluutsed konstandid. Väljavõte Leica Captivate tarkvara manuaalist (Leica Captivate Technical Reference Manual. Version 3.0. English: 252).

Prisma nimi	Nimetus tarkvara me-nüüs	Tüüp	Leica kons-tant	Absoluut-konstant
GRZ4, GRZ122	Leica 360° prism	Prisma	+23.1 mm	-11.3 mm
GMP111-0	Leica mini 0	Prisma	0.0 mm	-34.4 mm
GRZ101	Leica mini 360°	Prisma	+30.0 mm	4.4 mm
GMP101, GMP111	Leica mini prism	Prisma	+17.5 mm	-16.9 mm
GZM29, GZM30, GZM31, CPR105	Leica reflective tape	Kleebis	+34.4 mm	0.0 mm
GPR1, GPR111, GPR113, GPR121, GPH1P	Leica round prism	Prisma	0.0 mm	-34.4 mm
	Any surface	Reflektorita	+34.4 mm	0.0 mm

Hea ja ülevaatliku kirjelduse sellest, missuguseid kontrolle tuleks tahhümeetri regulaarselt teha, leiab Kala jt õpikust (2015: 56–57). Meie mõõtmistele eelnes elektrontahhümeetri kollimatsioonivea, vertikaalringi nulliasendi, inklinatsioonivea ning kompensatori kontroll aparraadi oma protseduuride järgi. Mõõtmisvahendid jäeti enne mõõtmisi vähemalt tunniks ajaks välistemperatuuriga aklimatiseeruma ja võimalusel välditi mõõtmist kuuma ilmaga ja lauspäikeses.

### 3.3. Staatile GNSS mõõtmine

Nagu ülalpool mainitud, lubab Geodeetiliste tööde kord KGV 2. järgu punkti mõõdistamisel kasutada staatilist suhtelist GNSS tehnoloogiat. Kuidas mõõtmisi korralda määru-ses täpsustatud ei ole: kui pikk peaks olema mõõtmisaeg, missuguse antennitüübiga vastuvõtja jne. Lähtuda

saab ainult Maa-ameti juhendist. Seal on kirjeldatud GNSS mõõtmiste metoodikat ja arvestada tuleb järgmisi nõudeid:

- Lähtepunktide koordinaatide määramine GNSS mõõtmiste metoodikat kasutades peab tagama 1. järgule vastava täpsuse (võrgu punkti plaanilise asendi keskmine ruutviga  $\pm 1$  cm riikliku geodeetilise võrgu või tihendusvõrgu punktide suhtes).
- Vähendamaks GNSS signaalide peegeldumist ümbritsevast keskkonnast (*multipath, scattering*) tuleb GNSS mõõtmistel kasutada *choke ring* tüüpi põhjaplaadiga (*ground plane*) GNSS antenne või teisi vähemalt samasuguste peegeldumist vähendavate omadustega antenne. Mõõtmistel kasutatavad GNSS antennid peavad olema samatüübilised, s.o antennide faasisentrite muutus peab olema identne.
- GNSS mõõtmistel tuleb kasutada kahesageduslikke GNSS vastuvõtjaid. GNSS vastuvõtjad peavad võimaldama mõlemal sagedusel (L1 ja L2) täistsüklite (*whole cycles*) kasutamist
- GNSS mõõtmisessioonide pikkuseks peab olema minimaalselt 90 minutit, kasutada tuleb eranditult staatilist mõõtmismeetodit.
- GNSS mõõtmised tuleb projekteerida selliselt, et võrku kuuluksid vaid sõltumatud ehk mittetriviaalsed vektorid. Mittetriviaalsetest vektoritest võrk peab moodustama lausvõrgu (vektoritest moodustatud kujundiks on kolmnurk).
- Mõõdetud vektoritest koosnev võrk tuleb tasandada vähimruutude meetodil. Kasutatav tarkvara peab võimaldama tulemuste täpsushinnangu otsest võrdlust nõuetega (peab olema antud koordinaatide täpsushinnang) (Kohaliku... 2018: 7).

Mõõtmiste planeerimiseks võib nõuandeid leida Rüdja ja Sanderi õpikust “Globaalne asukohamääramine”, eriti selle viiendast ja kuuendast peatükist. Rüdja ja Sander (2013: 230) märgivad, et Eestis ei ole kehtestatud norme, millest mõõtmiste planeerimisel lähtuda. Nad hoiatavad erinevate antennide kooskasutusega kaasnevate ohtude eest (samas: 207) ja annavad ülevaate andmete järeltöötlusest (samas: 232–244).

GNSS mõõtmine KGV 2. järgu punktidele koordinaatide määramiseks pole seadusandlikult täpselt reguleeritud. Eeskujuks ja orientiiriks võeti osalt Soome ametlikud soovitusel. Nende kohaselt peab kasutama antenne, mis on arvutamiseks kasutatavale tarkvarale tuttavad (JHS 184 2017: 9). Püsijaamades, mille andmeid samuti arvutustes kasutati, on teistsugused antennid,



kuid järeltöötuses kasutatavad IGS (International GNSS Service) antennide absoluutse kalibreerimise parameetrid peaksid erinevate antennide kooskasutamise mõju suures osas elimineerima.

Võrreldes Eestis kehtivate nõuetega on Soomes staatilisel mõõtmise puhul reguleeritud mitte ainult mõõtmise pikkus vaid ka vaatluste salvestamise tihedus, lähtepunktide kaugus, arv ja satelliitide arv ning PDOP väärtus (vt lisa 1). Kui tasandusarvutuseks kasutatakse püsijaamade andmeid, piisab E5 (vastab meie KGV 2. järgule) punktide mõõtmiseks vaid ühest antennist ja vastuvõtjast. Kõrgemasse klassi kuuluvaid tugijaamu peab siis olema 100 km raadiuses vähemalt kolm ja lisaks tuleb tööalal mõõta ka üks samasse klassi kuuluv kontrollpunkt. 100 km vektori korral on nõutud mõõtmisaeg suurem, kolm tundi. Järeltöötuses tehakse vektorarvutus ja võrreldakse vaba tasanduse (punkti asukoht määratud ühe vektoriga) ja seotud tasanduse (kõik kolm vektorit) koordinaate, mille erinevus võib olla kuni 25 mm. (JHS 184 2017: 18–19).

Käesoleva magistritöö jaoks mõõdeti staatselt kahel erineval KGV punktil ja tulemusi töödeldi kahel erineval moel, nii et need vastaks tinglikult Eesti ja Soome soovitude miinimumnõuetele. Kuna kõik uuritavad KGV punktid asuvad kohas, kus naaberpunkt on lähemal kui 500 m ja punktide vahel on ka nähtavus, tuleks Soome nõuete kohaselt mõõta ka nende KGV punktide vahelised vektorid.

Koha peal mõõdeti kahe vastuvõtjaga – uuritava punktil ja tihendusvõrgu punktil (RGV tihendusvõrgu punkt Räni numbriga 749). Kordusmõõtmisi (mida igal juhul soovitab Rüdja ja Sanderi õpik), ei tehtud. Tehti kaks 90-minutilist mõõtesessiooni. Arvutustes kasutati lisaks Trimble VRS Now Tartu püsijaama andmeid ja kolme Maa-ameti GNSS püsijaama andmeid. Maa-ameti jaamadest valiti Tartu ümbrusest Tõravere, Mehikoorma ja Jõgeva. Pikim vektor Mehikoorma ja Jõgeva vahel on umbes 85 km pikkune.

### **3.4. Võrgu RTK mõõtmine**

Eestis kehtivate regulatsioonide kohaselt RTK GNSS meetod KGV punktidele koordinaatide määramiseks lubatud ei ole. Kui võtta siingi eeskujuks ülalkirjeldatud Soome juhend, siis mitte

ühelgi vaatlusalustest geodeetilistest märkidest selline mõõteviis aktsepteeritav ei oleks. Selle juhendi kohaselt, kui punktide vahe on väiksem kui 500 m ja nende vahel on olemas nähtavus, tuleb kasutada muud mõõtmismeetodit, mis võimaldab punktidevahelise vektori otsese mõõtmise.

Viimastel aastatel on EMÜ-s kaitstud mitmeid bakalaureuse- ja magistritöid, mis uurivad võrgu RTK mõõtmistäpsust ja tulemused ei ole just kuigi julgustavad (nt Uusmaa 2019, Kõre 2018, Rosenberg 2018, Svežova 2018, Kirs 2017). RTK mõõtmistel on suuremad kõrguslikud vead (kuni 6 cm), plaanilised erinevused kontrollpunkti koordinaatidega on väiksemad, jäädes üldjuhul paari sentimeetri piiresse, kohati siiski ületades KGV mõõtmise täpsusnõudeid.

Magistritöö jaoks viidi siiski läbi eksperiment, mille käigus kolmel vaadeldaval geodeetilisel punktil teostati plaaniliste koordinaatide määramiseks võrgu RTK mõõtmine. Lisaks mõõdeti võrgu RTK meetodil koordinaadid mõnede olemasolevatele KGV punktidele. GNSS vastuvõtja seadistati salvestama ainult selliseid mõõtmistulemusi, mille hinnanguline täpsus mahub 2 cm piiresse. (Proovisin piiriks seada ka 1 cm, aga selle saavutamine osutus keeruliseks kõikidel vaadeldud juhtudel.) Veahinnang võtab arvesse ka kõrguse, plaanilistel koordinaatidel on see reeglina parem. Võrreldes ülalmainitud bakalaureuse- ja magistritöödega, mille tarbeks salvestati teatud intervalliga kõik lugemid ilma GNSS seadmes täpsuspiiranguid seadmata, peaks tänu sellele olema välistatud suure veaga tulemuste kasutamine. Tuleb muidugi arvesse võtta, et tegemist on eelhinnanguga, mis arvutatakse GNSS seadme tarkvara abil ja põhineb sellel, kui täpne algtundmatute lahend on antud oludes võimalik. Rusikareeglina on see hinnang optimistlikum kui saavutatud tegelik täpsus (Häkli 2004: 11).

Mõõtmiste nõuetekohaseks läbiviimiseks tuleb teostada seadme kontroll soovitatavalt kõrgema klassi geodeetilisel punktil enne ja pärast mõõtmist. GNSS seadme kontrolli enne ja pärast töö tegemist ning tulemuste dokumenteerimist näeb ette ka Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrus “Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavad nõuded”.

RTK mõõtmisel kasutati nii GPS kui Glonass satelliite, satelliitide tõusunurga väärtuseks oli 10°. GNSS seade seadistati automaatselt salvestama punkti koordinaati peale 20 mõõtmist. Automaatne salvestamine toimub vaid juhul, kui mõõtmised mahuvad seatud täpsushinnangu piiresse, vastasel juhul peab kasutaja otsustama, kas soovib tulemust hoolimata halvemast täpsushinnangust salvestada või teha uue mõõtmise. Antud töö jaoks tehti sellisel juhul uus

mõõtmine. Kokku salvestati viis mõõtmist, iga kord seadet uuesti initsialiseerides. Seejärel tehti uus seeria mõõtmisi vähemalt kolmveerandtunnise vahega.

RTK mõõtmised toimusid kõik 8.08.2020. Esimene mõõtesessioon algas riikliku võrgu II klassi kuuluval Lemmatsi 97 punktil kontrolliga (vt tabel 4) kell 13:55 ja lõppes Jaama tänaval 15:40. Kõige kõrgem PDOP väärtus oli 1,6 ja madalaim 0,9. Algtundmatute lahendamiseks kasutas GNSS seade 7–11 GPS satelliiti ja 5 – 8 Glonassi satelliiti. Neljal juhul olid Glonass satelliidid algtundmatute lahendusest kõrvale jäetud. Need olid küll kättesaadavad ja vahetult enne ja pärast toimunud initsialiseerimiste puhul olid seadme algoritmid need kasutusse võtnud. Teine mõõtesessioon toimus samal päeval algusega 18:40 Jaama tänava punktil ja lõppes kontrolliga Lemmatsi punktil kell 19:45. Kõrgeim PDOP väärtus oli 1,9 ja madalaim 1,0. Kasutuses oli 8–9 GPS ja 6–8 Glonassi satelliiti, kusjuures jälle olid neljal juhul Glonassi satelliidid algtundmatu lahendusest kõrvale jäänud.

**Tabel 4.** RTK GNSS seadme kontroll Lemmatsi 97 riikliku võrgu II klassi punktil. Saadud koordinaadid ja nende erinevus geodeetiliste punktide andmekogu koordinaatidest

Lemmatsi 97	X (m)	Y (m)	h (m)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta h(m)$
Andmekogu koordinaadid	6470080,365	656449,109	66,872			
1. sessiooni käigus mõõdetud koordinaadid	6470080,372	656449,106	66,859	0,007	-0,003	-0,013
1. sessiooni mõõtmiste standardhälve	0,0019	0,0069	0,0190			
2. sessioon käigus mõõdetud koordinaadid	6470080,377	656449,113	66,891	0,012	-0,004	-0,019
2. sessiooni mõõtmiste standardhälve	0,0091	0,0076	0,0152			
Kahe sessiooni keskmised koordinaadid	6470080,374	656449,109	66,875	0,009	0	0,003
Kahe sessiooni mõõtmiste standarhälve	0,0079	0,0098	0,034			

Mõõtmistulemuste keskmise arvutas GNSS seadme tarkvara mõõtmise käigus ja sellest lähtusin kontrolli tulemuste hindamisel väljas. Standardhälbed arvutati mõõtmisandmete failist Excel funktsiooniga STDEV ja korrutati läbi 1,96 (et vastaks 95% tõenäosusele). Plaaniliste mõõtmistulemuste hajuvus pole väga suur, standardhälve jääb 1 cm piiresse, kõrguslikult on mõõtmiste stabiilsus väiksem, ulatudes mõlema sessiooni mõõtmisi arvesse võttes 3,4

sentimeetrini. Väljas hinnati vaid võrgu RTK mõõtmiste keskmiste väärtuste mahtumist KGV punktile lubatud  $\pm 2$  cm piiresse ja tulemus näis sobiv. Kui saadud keskmistele koordinaatidele lisada standardhälbed, jäävad plaanilised koordinaadid lubatud piiresse, kõrguslikud tulemused on kehvemad. Käesolev magistritöö keskendubki plaanilistele koordinaatidele, seega tasub meetodit võrdluses kasutada.

### **3.5. Vastulõike meetod ja kombineeritud mõõtmine**

Randjärve (2002: 238-240) “Geodeesia IV osa” järgi võib üksikute KGV punktide määramisel edukalt kasutada vastulõike meetodit. Nurgalise vastulõike puhul tuleks kasutada vähemalt viit lähtepunkti (samas), Kala jt (2015: 87) järgi on usaldatavaks kontrolliks ja tasandamisvõimaluseks vaja vähemalt nelja lähtepunkti. Joonelise vastulõike jaoks on polügonomeetria mõõtmistes vaja vähemalt kolme lähtepunkti (Kala jt 2015: 87). Tänapäevaste elektrontahhümeetritega on lihtne mõlemad mõõtmised koos teha ja sooritada joonelisnurgaline lõige (samas). See on väga levinud ja geodeetide jaoks igapäevane töövõtte tahhümeetri orienteerimisel lõigetega vabas jaamas. Enamus tahhümeetreid on varustatud vastavate tasandusprogrammidega, meetodit saab seejuures valida. Meie kasutatud Leica tahhümeeter ja tarkvara võimaldavad tasandamiseks kasutada Helmerti, vähimruutude meetodit ja robustset meetodit (Leica Captivate Technical Reference Manual. Version 3.0. English: 252) ja kohe kuvatakse ka sidumise täpsushinnang.

Kui tasandus tehakse tahhümeetri enda tarkvaraga, tuleb väljas mõõdistades tahhümeetrisse lisada ilmastiku ja projektsiooniparandid. Tahhümeetri tarkvara arvutab lähtepunktide kokkusobimatuse ja soovi korral võib vastulõike tasandada, suurema veaga tulemust välja jättes. Võrreldes spetsiaalse järeltöötlustarkvaraga pole aga tahhümeetri väliarvutis võimalik “välja lülitada” üksikuid jämeda veaga mõõtmistulemusi. Käesoleva töö jaoks tehti mõõtmised tahhümeetri käiguprogrammiga (*Leica Captivate* tarkvara *Traverse*-moodul) ja parandid lisati ja tasandusarvutus teostati SBG Geo programmis, et tulemused oleksid teiste tasandusarvutustega hästi võrreldavad ja jämeda veaga mõõtmistulemused saaksid avastatud ja lõplikust tasandusest välja jäetud.

Harvadel teisaldamist vajavatel KGV punktidel võib juhtuda, et piisav hulk lähtepunkte on juba olemasolevas võrgus. Nii oli see geodeetilise märgi nr 20064 korral Turu ja Ropka tänavate ristis, kus määratavalt punktilt oli nähtavus neljale olemasolevale KGV punktile. Kopli tänava märgi 20087 ja Jaama tänava märgi 10031 juures mõõdeti vastulõike jaoks viis ajutist kindelpunkti võrgu RTK meetodil. Kokku tehti igal ajutisel punktil üheksa RTK mõõtmist kolme erineva initsialiseerimisega ja tasandusarvutuses kasutati saadud mõõtmiste keskmist väärtust. Punkti 20064 juures mõõdeti olemasolevatele kohaliku võrgu punktidele uued koordinaadid võrgu RTK mõõtmisega.

Mitte ühegi vaadeldud riigi seadusandluses pole sellist meetodit kirjeldatud. Võrreldes lihtsa võrgu RTK mõõtmisega on sellise meetodi eeliseks suurem kontrollitavus (võrgu RTK meetodil mõõdetud koordinaadid saavad sobivushinnangu vastulõike abil) ja vigade ühtlane jaotumine tasanduses.

### **3.6. Kõrguste mõõtmine**

Mis puudutab kõrguste mõõtmist, siis selles osas on Eesti seadused-määrused kõige raskemini tõlgendatavad. Kui plaanilise võrgu puhul on mõõtmise täpsusnõuded suhteliselt arusaadavad, siis KGV-de praegustes koosseisudes on kõrguslikult väga erineva täpsusklassiga punkte ja pilt üsna kirju. Soomes, kus staatiline GNSS ja isegi RTK meetod on täiesti aktsepteeritavad mõõtmisviisid, võib sellisel moel leida ka kõrguse. Kõrguslik erinevus kahe mõõtesessiooni vahel või mõõdistatud punkti ja kontrollpunkti vahel peab mahtuma küllaltki suurde,  $\pm 7$  cm vahemikku (Juhta soovituset 2017: 19–21).

Maa-ameti kodulehelt leiab “Kõrgusvõrgu rekonstrueerimise ja nivelleerimise juhendi”, aga see käsitleb kõrgtäpset nivelleerimist riikliku kõrgusvõrgu punktidel. Geodeetiliste tööde... § 6 lõige 2 sätestab kõrguste mõõtmise kohta vaid seda, et kasutada tuleb trigonomeetrilist või geomeetrilist nivelleerimist.

Maa-ameti juhendist (Kohaliku... 2018: 8) leiab täpsustusi:

*Kohaliku võrgu kõrguslikeks lähtepunktideks (lähtereepiteks) peavad olema riikliku kõrgusvõrgu reeperid.*

*Kõrguslike lähtepunktide arv sõltub asula suurusest ning võrgu konfiguratsioonist ja ülesehitusest. Minimaalseks lähtereeperite arvuks on 3 (kolm).*

*Kohaliku võrgu punktidele määratakse kõrgused kas geomeetrilise või trigonomeetrilise nivelleerimisega. Nivelleerimiskäigu või polügooni sulgemisviga ei tohi ületada  $\pm 5 \sqrt{n}$  mm või  $\pm 20 \sqrt{L}$  mm, kus  $n$  on seisupunktide arv käigus ja  $L$  käigu pikkus kilomeetrites.*

Seega, praegu kehtivate seaduste kohaselt tuleb kõikidele KGV punktidele, ka 1. järgu omadele, millele koordinaadid leitakse suhtelise staatilise mõõtmise abil, kõrgused mõõta kas trigonomeetrilise või geomeetrilise nivelleerimisega ja mõõtmise lähepunktiks peavad olema riikliku kõrgusvõrgu reeperid. (GNSS mõõtmisega saadakse GRS80 ellipsoidi kõrgused, mis geoidi mudelit kasutades arvutatakse ümber EH2000 kõrgusteks, kuid tegemist ei ole mõõdetud kõrgustega.)

Magistritöös vaadeldavatest punktidest kaks on saanud endale kõrguse 2. klassi nivelleerimisega Tartu linna kohaliku kõrgusvõrgu rekonstrueerimisel aastatel 2017–2018 ja nende kontrolli või asenduse korral tuleb kõrgus määrata või kontrollida sama metoodika kohaselt. Eesti Maaülikoolil või OÜ-l WeW puudub nõuetekohane aparatuur (kalibreeritud invarlatid), et sellist tööd läbi viia. Jaama tänava punkti nr 10031 kõrgust kontrollis OÜ Metricus ja ülejäänud punktid ootavad, et enne nivelleerimist oleks need läbinud vajumisperioodi sügis-kevad-talv, nagu määrus “Geodeetiliste tööde tegemise ja geodeetilise märgi tähistamise kord, geodeetilise märgi kaitsevööndi ulatus ning kaitsevööndis tegutsemiseks loa taotlemise kord” § 7 lõige 3 ette näeb. Punktid on praegu saanud kõrguse trigonomeetrilise nivelleerimisega või koos polügonomeetria mõõtmisega. Et võrdlus päris nõuetekohaselt tehtud tööga oleks võimalik vaid punktis 10031, jääb kõrgusliku täpsuse teema praegusest tööst välja.

### **3.7. Järeltöötlus**

Tasandusarvutusteks kasutati tarkvara SBG Geo 2020.02. võrgutasandusmoodulit. Staatilise GNSS mõõtmise andmete töötlemiseks kasutati tarkvara Trimble Business Center. Kommertstarkvarade puhul pole kasutajal enamasti kuigi suurt kontrolli kasutatavate

algoritimide üle. Tähelepanelik tasub olla ka terminoloogia osas – näiteks kasutavad antud programmid seotud tasanduse mõistet erinevalt.

Põhjaliku ülevaate SBG Geo võrgutasandusmoodulist ja selle kasutamisest KGV mõõtmistulemuste tasandamisel leiab Pertmanni (2004) bakalareusetööst. Tarkvara enda kasutusjuhise (User manual... 2017) on samuti üsna selge ja ülevaatlik ning aitab lisaks vajaliku töövoo selgeks saamisele paremini mõista, missugused matemaatilised ja statistilised meetodid on tarkvara toimimise aluseks.

Plaanilise võrgu ja kõrgusvõrgu tasandus tehakse Geos eraldi. Mõõtmisandmed tuleb laadida vastavasse faili (*Horizontal net adjustment document* või *Levelling Net Document*).

Enne andmete laadimist võrgutasandusmoodulisse tuleb sisestada projektsiooni parand ja atmosfääri parandite jaoks temperatuur ja õhurõhk (minu puhul digitaalse ilmajaama andmete failist, Kopli tänava esimese mõõtmise puhul EMHI vaatlusandmetest). Õhuniiskusega Geo tarkvara ei arvesta. Andmed tuleb hoolega üle vaadata, sest tasandusmoodulis neid parandeid enam ei kuvata ja parand antakse igale jaamale eraldi.

Andmete laadimisel Geo võrgutasandusmoodulisse tuleb esmalt sisestada mõõtmiste *a priori* täpsushinnangud (standardhäbed) – joone- ja suunamõõtmise viga, tsentreerimise viga ja koordinaatide eeldatavad vead (joonis 4). Nende määramisel tuleb lähtuda tahhümeetri spetsifikatsioonist ja koordinaatide puhul nende teadaolevast täpsushinnangust. Sisestatud koordinaatide vigu võetakse arvesse ainult teatud tingimustel, seotud tasandusel arvatakse koordinaadid veatuks nagu võrkude hierarhia ette näeb.

A priori std deviations

Filename:

Distances: 1.0010 + 1.5000 ppm

Centering: Std dev.: 0.0010

Directions: Std dev.: 0.00030

Bearings: Std dev.: 0.00200

No of rounds: 1

No of rounds: 1

Coordinate differences: N & E Std dev.: 0.0050

Coordinates: N & E Std dev.: 0.0200

Covariance: 0

Covariance: 0

Calculate control quotients as:

☒ Standardized residuals

☐ Test quotients

Settings name: [dropdown]

OK Cancel Help Save Delete

**Joonis 4.** A priori täpsushinnangute sisestamine SBG Geo programmi

Kala jt (2017: 43) soovivad aprioorse veahinnangute puhul mingilgi moel välistingimuste mõju arvesse võtta, sest muidu muutuvad käigu täpsuse eelarvutus ja täpsusnormatiivid üleüldse mõttetuks. Normaalsete mõõtmistingimuste korral võiks selle lugeda võrdseks instrumentaalse veaga. Võib eeldada, et mõõtmiste arvu suurendes välistingimuste viga väheneb, eriti kujutise kvaliteedist ja võbisemisest tingitud vea arvel, samas kui refraktsiooniviga jääb ikka samaks. Autorid pakuvad  $k$  täisvõttega tehtud mõõtmiste vea kohta valemi

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_6^2 + \frac{m_3^2}{k} + \frac{m_4^2}{0,5k} + \frac{m_5^2}{0,5k}}$$

Selleks, et tasandusarvutust teha, tuleb mõõtmisandete faili sisestada ka teadaolevate punktide koordinaadid ja otsitavate punktide ligikaudsed koordinaadid.

Geo programmis on võimalik valida erinevate tasandusviiside vahel: vaba tasandus (*free adjustment with translation and rotation*), seotud tasandus (*strict adjustment*) ja elastne tasandus (*elastic adjustment*).

Esmalt on otstarbekas teha vaba tasandus, sest selle käigus ilmnevad jämedad vead on seotud ainult mõõtmiste täpsusega ja võimalik kokkusobimatus lähtepunktidega rolli ei mängi. *Rotation* (pööramine) meetodi nimes tähendab, et kindelpunktide andmetele tuginedes saab võrk oma orientatsiooni. Kõiki kindelpunkte käsitletakse siiski veel “liigutatavatena” ja neile arvutatakse uued koordinaadid.

	Active	Obs Type	Station	Object	Value	A pr. StdDev	A pr. SD+C	Residual	Adj. value	Std Dev	Std Residual	R number	MDE	ER
58	<input checked="" type="checkbox"/>	Length	N-1	10185	251.4160	0.0023	0.0025	0.0001	251.4161	0.0009	0.0186	0.9532	0.0065	0.0003
59	<input checked="" type="checkbox"/>	Direction	N-1	TS0001	341.24632	0.00003	0.00052	0.00068	341.24700	0.00029	0.8158	0.8951	0.00009	0.00001
60	<input checked="" type="checkbox"/>	Length	N-1	TS0001	121.4869	0.0019	0.0021	0.0010	121.4879	0.0008	0.2853	0.9488	0.0054	0.0003
61	<input checked="" type="checkbox"/>	Direction	N-1	TS0001	341.24612	0.00003	0.00052	0.00088	341.24700	0.00029	1.0546	0.8951	0.00009	0.00001
62	<input checked="" type="checkbox"/>	Length	N-1	TS0001	121.4867	0.0019	0.0021	0.0012	121.4879	0.0008	0.3417	0.9488	0.0054	0.0003
63	<input checked="" type="checkbox"/>	Direction	N-1	10185	197.91411	0.00003	0.00025	0.00019	197.91429	0.00014	0.4335	0.8926	0.00009	0.00001
64	<input checked="" type="checkbox"/>	Length	N-1	10185	251.4157	0.0023	0.0025	0.0004	251.4161	0.0009	0.0943	0.9532	0.0065	0.0003
65	<input checked="" type="checkbox"/>	Direction	TS0001	N-1	141.24609	0.00003	0.00062	-0.00216	141.24393	0.00030	-2.5912	0.8884	0.00009	0.00001
66	<input checked="" type="checkbox"/>	Length	TS0001	N-1	121.4882	0.0019	0.0021	-0.0003	121.4879	0.0008	-0.0928	0.9488	0.0054	0.0003
67	<input checked="" type="checkbox"/>	Direction	TS0001	10010	357.51489	0.00003	0.00090	0.00107	357.51596	0.00044	0.7399	0.9140	0.00009	0.00001
68	<input checked="" type="checkbox"/>	Length	TS0001	10010	71.1393	0.0017	0.0020	0.0008	71.1401	0.0008	0.2454	0.9481	0.0049	0.0003
69	<input checked="" type="checkbox"/>	Direction	TS0001	10010	357.51570	0.00003	0.00090	0.00026	357.51596	0.00044	0.1790	0.9140	0.00009	0.00001

**Joonis 5.** Vaba tasanduse tulemuste vaade. Suur hälve (Residual) ja standardiseeritud hälve (Std Residual) on kuvatud punasega.

Vaba tasanduse tulemuste hulgast tuleks enne seotud tasanduse tegemist jämedad vead eemaldada. Jämedaid vigu ei tohiks mõõtmistulemuste hulgas olla palju, vigade esinemine peaks alluma normaaljaotusele.



Veergudest, mis on samad ka teiste tasandamismeetodite korral (joonis 5), leiab järgmised näitajad (User manual... 2017):

- Esimesed seitse veergu on täidetud kasutaja sisestatud andmetega: „Active“- linnuke näitab, kas antud väärtus on tasandusarvutusse lülitatud, järgmistes veergudes on tema tüüp (suund või joonepikkus), jaam, kust mõõdetud ja jaam millesse mõõdetud, tasandamiseelne väärtus ja *a priori* standardhälve ning *a priori* standardhälve koos tsentreerimise veaga. Järgmises seitse veergu sisaldavad väärtusi, mille programm on välja arvutanud.

- „Residual“ – mõõtmistulemuse parand

**Roheline:** parand on väiksem kui ühekordne mõõtmistulemuse *a priori* standardhälve,  
Must: parand on väiksem kui kahekordne *a priori* standardhälve

**Punane:** parand on suurem kui kahekordne *a priori* standardhälve.

*A priori* standardhälbe suuruse valik tasandamistulemusi ei mõjuta, aga on indikaatoriks, mis näitab, et tasandamistulemused kinnitavad/ei kinnita meie eelnevat täpsushinnangut.

- „Std Res“ – standardiseeritud hälve (parand/hälve jagatud ruutjuurega tema standardhälbest) ja värv standardiseeritud hälbe suurusele:

**Roheline:** alla 1;

Must alla 2;

**Punane** üle 2.

Standardiseeritud hälve allub eeldatavasti normaaljaotusele, mille kohaselt 68% mõõtmistest on standardiseeritud hälbe väärtus väiksem kui 1; 95 % protsendil väiksem kui 2 ja 99,7% väiksem kui 3. Väärtus üle kolme jääb sisaldab suure tõenäosusega jämedat viga ja tuleks tasandusest välja jätta.

Kontrollida tuleks ka mõõtmistulemust, mille standardiseeritud hälve on suurem 2-st, kuid jämeda vea puudumise korral võib sellise tulemuse veel tasandusse jätta. Standardiseeritud hälvete põhjal tuleks esmalt eemaldada tasandusest suurim viga ja teha tasandus uuesti, kuni tulemused saadakse jämedate vigadeta.

- „R number“ – tasandatud väärtuse usaldusväärsuse näitaja – liiasus (0-1), mis näitab kui palju tasandamistulemus on lisamõõtmiste poolt kontrollitud.

**Roheline** – liiasus on suurem kui 0,71

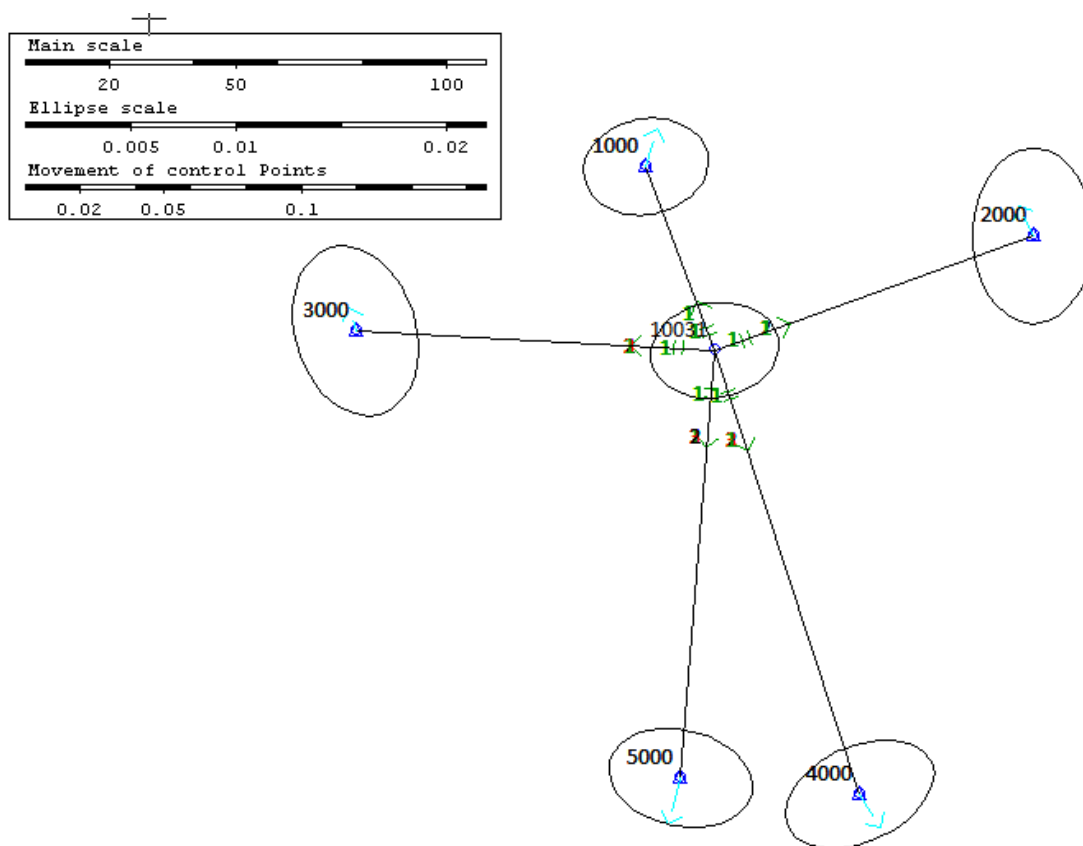
Must – 0,35 ja 0,71 vahel;

**Punane** – väiksem kui 0,35.

Jämedate vigade eemaldamise käigus võib võrgu liiasus muutuda väga väikeseks ( $rv \leq 0,5$ ), nii et vajalikuks võib osutuda looduses lisamõõtmiste tegemine. Nõrgad kohad võrgus on need, kus mõõtmistulemuse liiasus on väiksem võrgu liiasusest,  $ri < rv$ .

- MDE – „minimum detectable error“. Võrgu sisemise usaldusväärsuse näitaja. Näitab vea suurust, millest väiksemat viga pole antud võrgu liiasust arvestades võimalik tuvastada.
- ER – „external reliability“. Võrgu välise usaldusväärsuse näitaja. Suurus näitab, kui palju mõjub avastamata jäänud jäme viga antud mõõtmistulemust (User manual... 2017: 15.820 – 15.822).

Lisaks tabeli kujul esitatud andmetele saab mõõtmistest ja nende kvaliteedist ülevaatliku pildi Geo graafilisest vaatest (joonis 6).



**Joonis 6.** Veaeellipsite, liiasuse (noolte ja kriipsude värv mõõdetud suunal ja kaugusel, roheline suurem kui 0,71, must 0,35 – 0,71. punane alla 0.35), standardiseeritud hälvete (roheline kuni 1, must kuni 2 ja punane üle 2) ja nihete (helesiniste noole suund) kuvamine SBG Geo graafilises vaates pärast vaba tasandust.

Vaba tasanduse tulemused saab salvestada raportisse, kus on näha ka *a posteriori* kaaluühiku standardhälve. See on ideaalis 1,0, mis nätab, et kaalud on sobivad ja tulemus optimaalne. Vaba tasanduse puhul enamasti ignoreeritakse ühest oluliselt väiksemat kaaluühiku hälvet, sest see annab märku asjaolust, et veahinnangud olid liiga pessimistlikud. Kaalusid võib soovi korral skaleerida, aga tasanduse tulemust see ei muuda. Ka elastse ja seotud tasanduse järgne kaaluühiku standardhälve peaks olema statistiliselt ühega võrdne (Ghiliani ja Wolf 2006: 161).

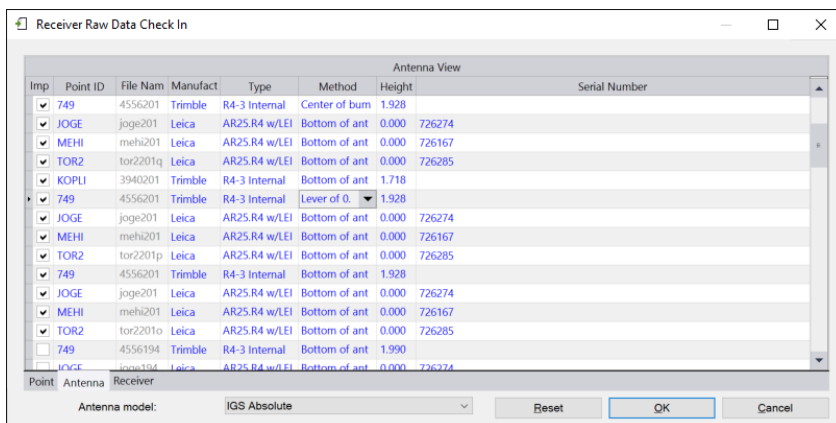
Kõige täpsem tasandusmeetod on SBG Geo kasutusjuhise (2017: 15:823) kohaselt elastne tasandus. Lähtepunktide liigutamiseks on ette antud tolerantsid – neid ei vaadelda mitte veatute punktidenä, vaid punktidenä, millel täpsushinnang on teada. Oma mõõtmises puutusin mitu korda kokku olukorraga, kus olemasoleva võrgu punkti tsenter oli nii kulunud, et ühe millimeetri täpsusega tsentreerimine polnud võimalik. Elastne tasandus on ainus viis, mille puhul selliseid erisusi saaks arvesse võtta. Kuna varasemate mõõtmiste (kindelpunktide) täpsusandmed pole enamasti teada ja olemasolevatele võrgupunktidele ei soovita uusi koordinaate arvutada, siis praktikas seda meetodit enamasti ei kasutata. KGV üksikute punktide taastamise polügonomeetriamõõtmisel, kuhu on kaasatud nii 1. kui 2. järgu punktid, saaks elastse tasandusega nendele koodinaatidele erineva kaalu anda. Minu töös oli elastsel tasandusel oluline roll vastulõike meetodil puhul: võrgu RTK-ga mõõdetud ajutiste kindelpunktide kasutamisel määrasin nende hinnangulised täpsused vastavalt GNSS kontrolli tulemustele Lemmatsi 97 punktil.

Seotud tasanduses pole enam võimalik arvestada lähtepunktide täpsuse erinevust. Seotud tasandus tähendab, et võrk “painutatakse” täpselt tuntud koordinaatidega lähtepunktide vahele. Tuleks vaadata erinevusi vaba ja seotud tasanduse vahel. Erinevused võivad tuleneda lähtepunktide kokkusobimatuses. Tasandust tuleks teha uuesti kõige tõenäolisema veaga lähtepunkti kindelpunktide hulgast välja jättes. Kui hälvete suund on sama, võib vaba võrgu tasanduse orientatsioon vajada parandamist.

Teine kasutatud tarkvara, Trimble Business Center (TBC), võimaldab erinevate mõõtmiste, sh tahhümeetriliste, tasandamist vähimruutude meetodil. Käesolevas töös kasutasin seda ainult staatilise mõõtmise andmete töötlemiseks. Erinevalt SBG Geost toimub võrgu plaanilise ja kõrgusliku osa tasandamine korraga 3D tasandusena. Ka TBC-l on põhjalik kasutusjuhise, milles seletatakse lahti võrgutasanduse teoreetiline pool. Kolm aastat tagasi Veiko Pullmanni (2017)

Eesti Maaülikoolis kaitstud bakalaureusetöös võrreldakse erinevaid staatilise andmetöötluste tarkvarasid ja sealt leiab huviline eestikeelse kirjelduse TBC töövoost GNSS staatiliste andmete programmi toomisest kuni GNSS vektorite töötlemiseni.

Trimble Business Center uuendab IGS antennikalibreerimise parameetrite faili (joonis 7) automaatselt (ja nende kasutusjuhendis on range soovitus seda ise käsitsi vastavasse kataloogi mitte panna) ja täpsete efemeriidide info saab samuti otse tööfailis automaatselt alla laadida.



**Joonis 7.** Mõõtmisandmete toomine programmi TBC

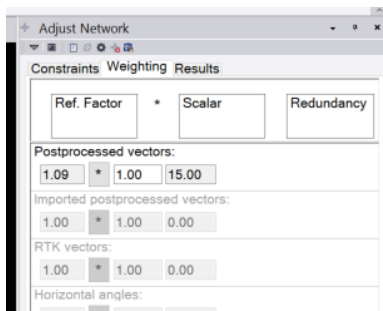
Enne tasanduse juurde asumist tuleb teha vektorarvutus. Programm tuleb seadistada kasutama täpseid efemeride.

Tarkvara teeb vaba tasanduse järgselt automaatselt  $\chi^2$  testi ja arvutab välja kaaluühiku standardhälbe. Enne jätkamist tuleks eemaldada jämeda veaga tulemused (standardiseeritud hälbe põhjal tasandusaruandest, joonis 8) ja vaadata üle kaalud (joonis 9).

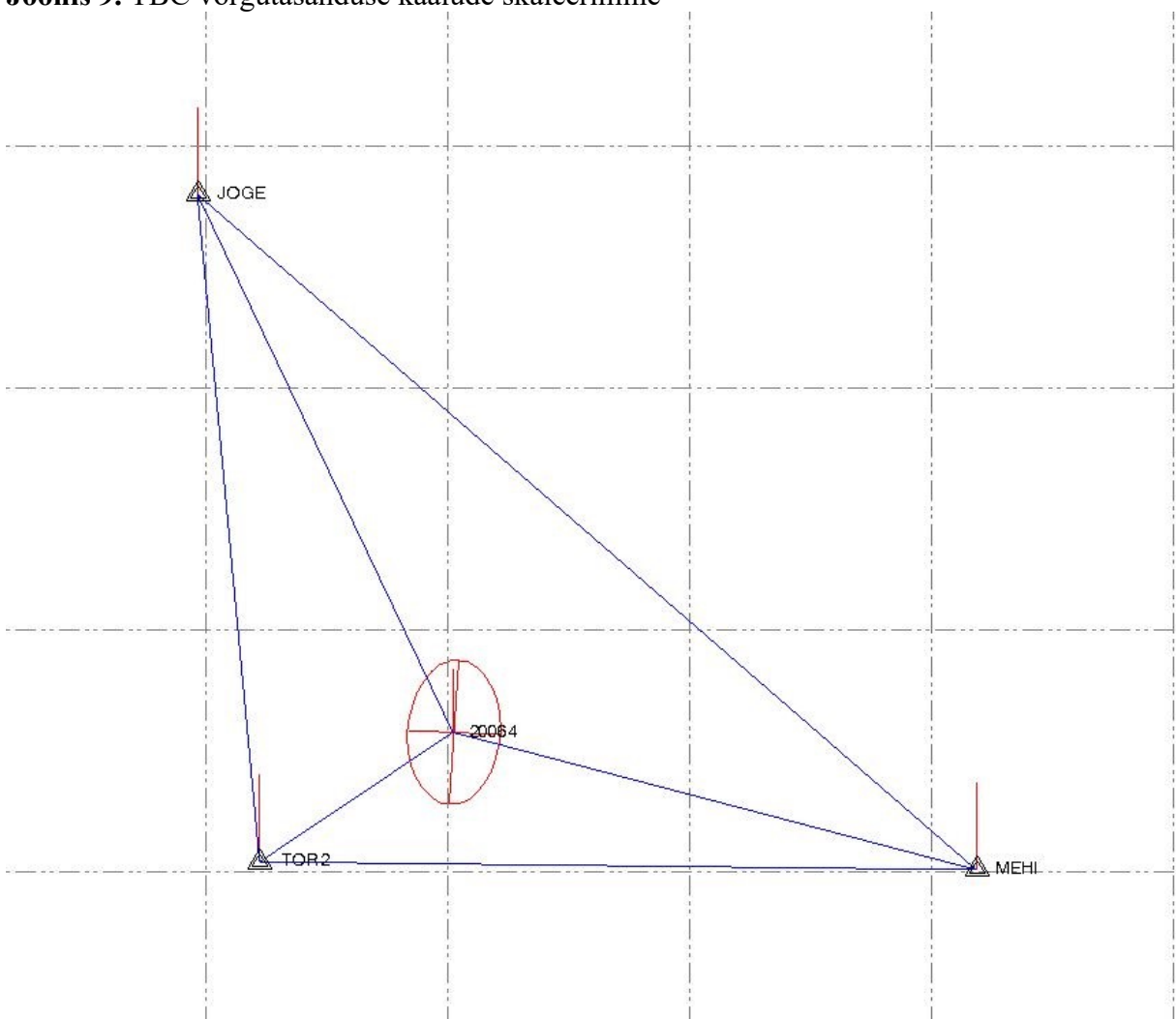
Observation ID		Observation	A-posteriori Error	Residual	Standardized Residual
<a href="#">EETR --&gt; KOPLI(PV10)</a>	Az.	329°45'40"	3.062 sec	-0.428 sec	-0.192
	$\Delta Ht.$	-6.7072 m	0.0445 m	0.0602 m	3.468
	Ellip Dist.	1098.2393 m	0.0167 m	0.0006 m	0.047
<a href="#">749 --&gt; KOPLI(PV16)</a>	Az.	114°16'46"	1.177 sec	0.001 sec	0.001
	$\Delta Ht.$	-14.0064 m	0.0445 m	-0.1230 m	-3.362
	Ellip Dist.	2944.4718 m	0.0155 m	0.0044 m	0.454
<a href="#">749 --&gt; TOR2(PV17)</a>	Az.	229°08'00"	0.093 sec	-0.095 sec	-0.481

**Joonis 8.** TBC vaba tasanduse raport

Kui kaaluühiku standardhälve on ühest väiksem, arvutab programm välja skaalafaktori, et see oleks ühega võrdne. Erinevad mõõtmisviisid saab erinevalt skaleerida, aga minu andmetes on tegemist ühesuguste mõõtmisviisidega.



**Joonis 9.** TBC võrgutasanduse kaalude skaleerimine



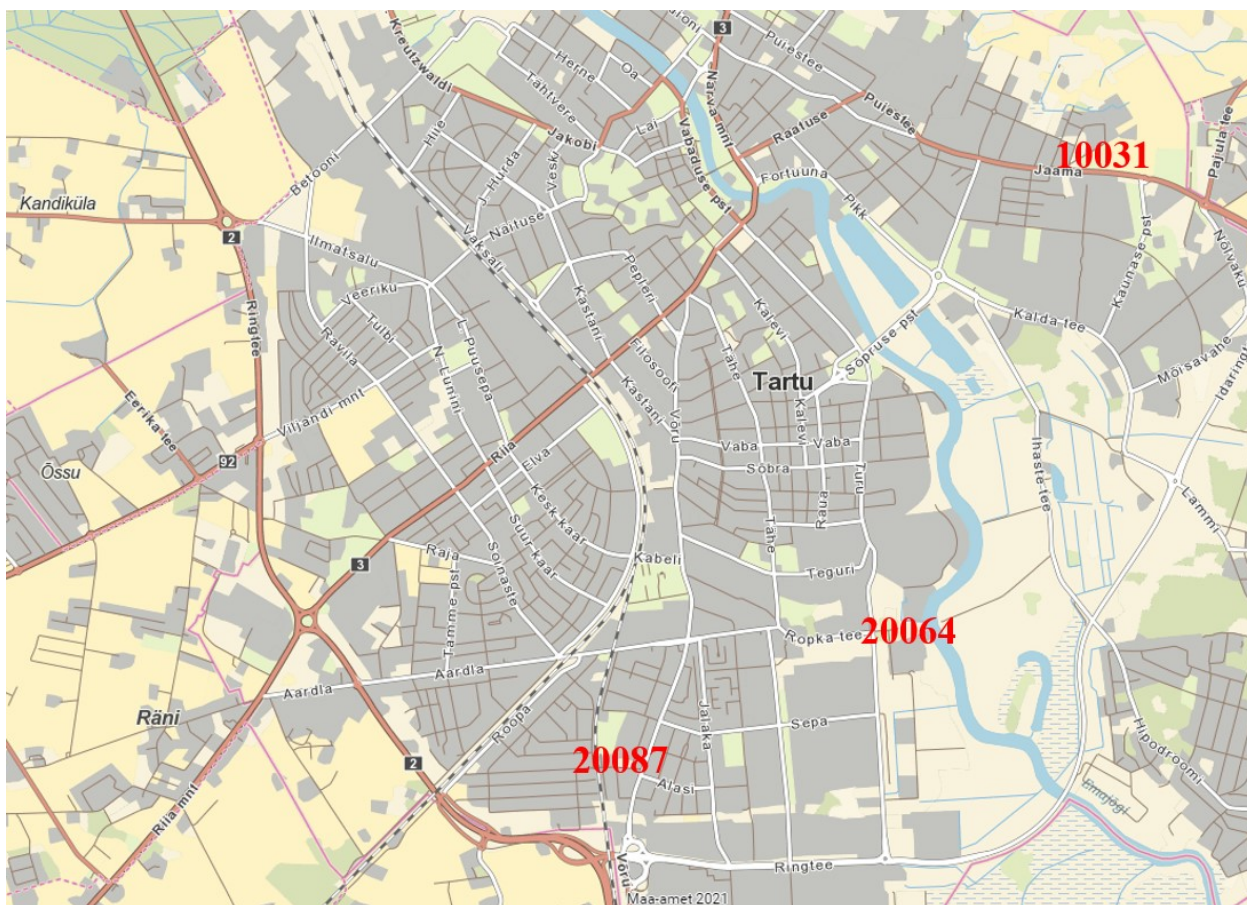
**Joonis 10.** Veallips tarkvaras TBC. Kõrguslikku viga iseloomustab vertikaalne joon.

Töö graafilises aknas kuvatakse sarnaselt teiste tasandusprogrammidega veaellipsid (joonis 10). Peale seotud tasandust tuleb koostada uus raport. Vastavalt raporti tulemustele võib kasutusjuhise kohaselt kontrollpunktide valikut muuta, et oma võrk siduda ainult kõige täpsematega nende hulgast. Raportist leiab uued koordinaadid ja nende standardhälbed,  $\chi^2$  testi (võrdleb *a priori* standardhälbe suurst *a posteriori* standardhälbega) tulemused ja info rakendatud piirangute kohta.

Töö lõpus lisades 2 ja 3 on ära toodud kas n  disaruannet: programmiga TBC tasandatud staatilise GNSS mõõtmise kohta ja SBG Geo pol  gonomeetriad   tmiste tasandusarunne.

#### 4. MÕÕTMISED JA TASANDUSARVUTUSED TARTU LINNA ÜRSIKUTE KOHALIKU VÕRGU PUNKTIDE TEISALDAMISEL JA KONTROLLIMISEL

Magistritöö praktilise osa jaoks mõõdeti erinevatel meetoditel kolme Tartu linna polügonomeetriapunkti koordinaadid. Punktide orienteeruvad asukohad on kaardil markeeritud punasega (joonis 11).



**Joonis 11.** Teisaldatud (20087, 20064) ja kontrollitud punktide (10031) asukohad Tartu linnas.

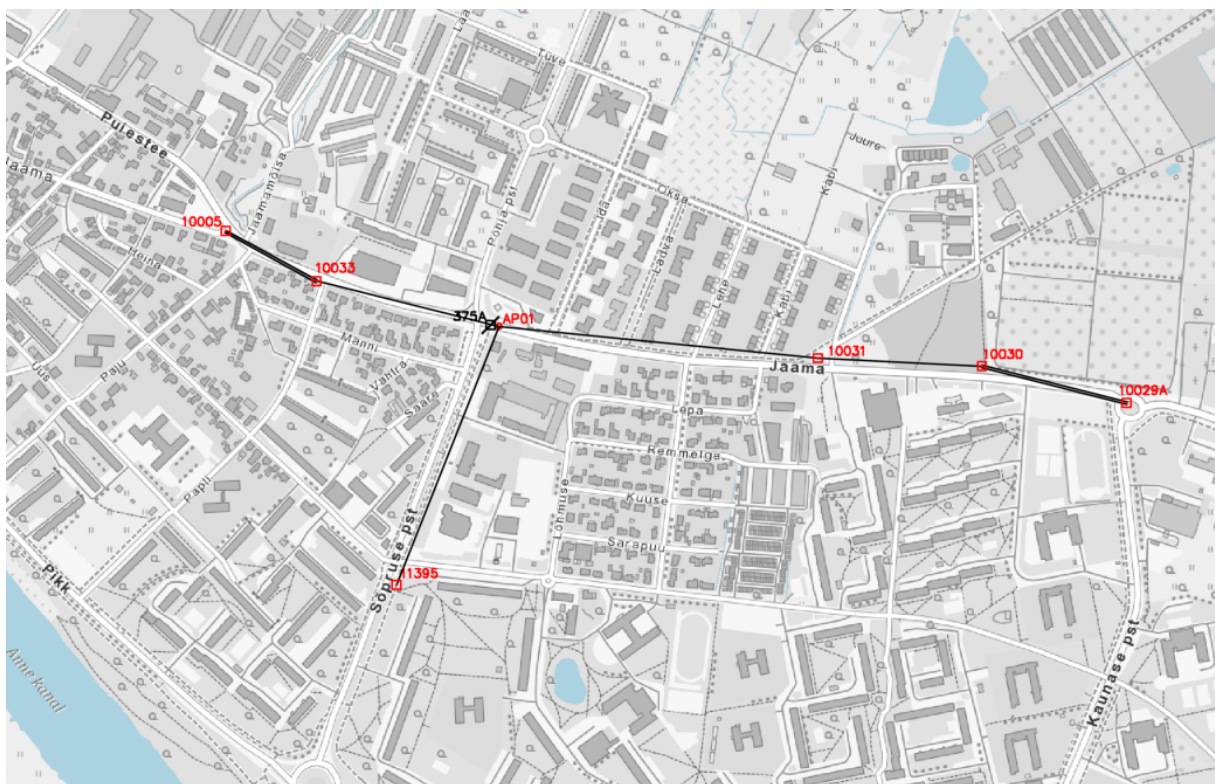
Punktid 10087 (uus number 20087) ja 10064 (uus number 20064) vajasis ümbertõstmist tänavaehitustööde tõttu, märk 10031 jäi selle lähistel toimunud ristmiku ümberehitustööde käigus paika, kuid vajab kontrollmõõtmisi. Maa-ametis heakskiidu saanud projekti kohaselt oli



kõikidel punktidel plaanis polügonomeetriamõõtmine. Sellele lisaks uurisin, kas GNSS tehnoloogiat kasutades oleks mõõtmisi teha lihtsam ja kiirem.

#### 4.1. Geodeetiline märk 10031 Jaama tänava ja Rõõmu tee ristmikul

Märk 10031 (joonis 12) vajab kontrollmõõdistust märgi kaitsevööndis toimunud ehitustööde tõttu. Tööde käigus märk säilis, krae, katteluuk ja tsenter arvati ülevaatusse käigus korras olevaks. Mõõtmisele eelnevalt vaadati üle 8 geodeetilist märki, millest märgi 375A alumiiniumist tsenter oli hävinud.



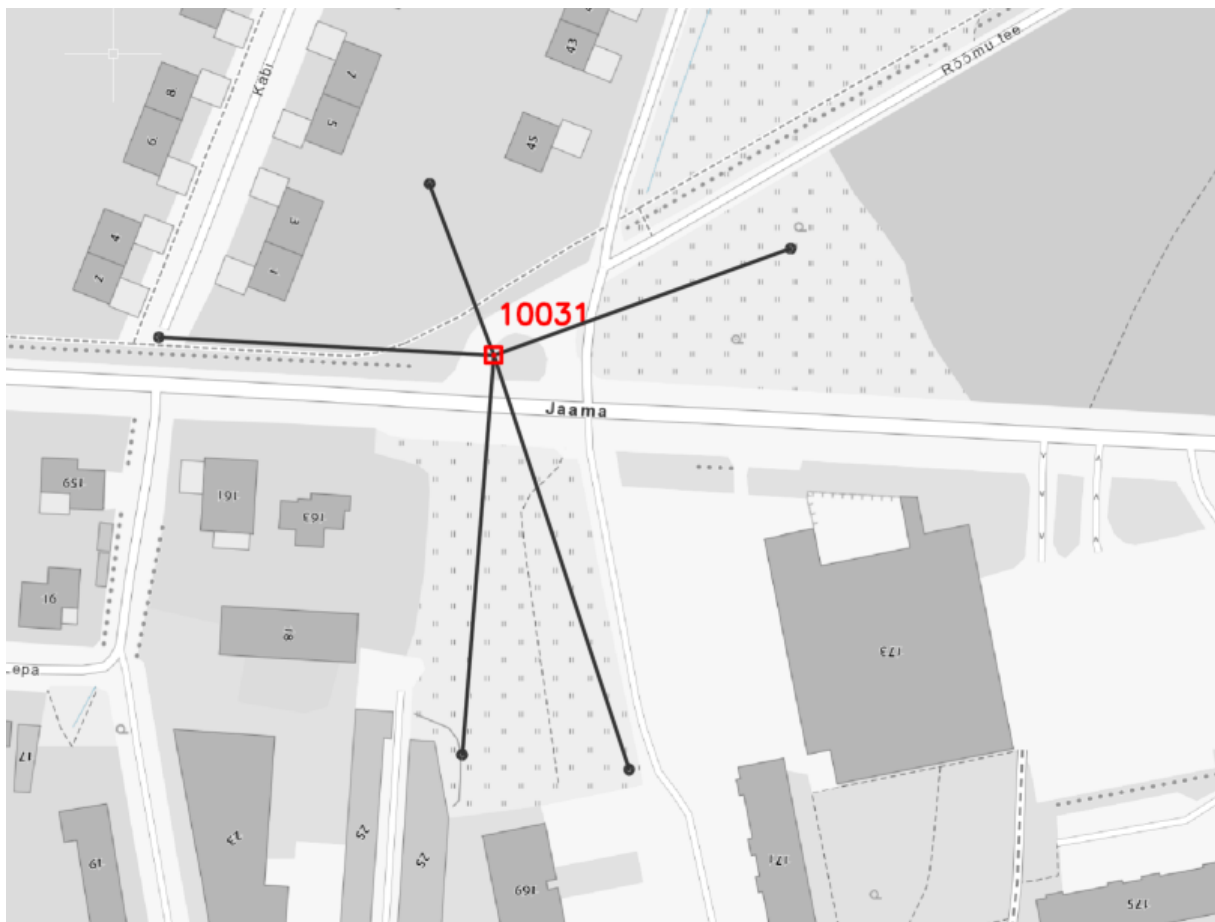
**Joonis 12.** Kontrollitav geodeetiline märk 10031 Tartu Jaama tänava ja Rõõmu tee ristmikul ja polügonomeetriakäigu kuju. □ – olemasolev geodeetiline märk; ⊗ – hävinud geodeetiline märk; ○ – ajutine punkt. Aluskaart Maa-amet.



Jaama tänava punktil nr 10031 tehti erinevatel aegadel järgmised mõõtmised:

- Polügonomeetriline mõõtmine 27.07.2020 ja 30.07.2020;
- võrgu RTK mõõtmine 08.08.2020;
- vastulõike meetodil koordinaatide määramine uuritavale punktile võrgu RTK meetodil mõõdetud ajutistelt kindelpunktideelt 08.08.2020.

27. ja 30.07 osales mõõtmistel lisaks töö autorile Janno Vään. Polügonomeetria mõõtmine seoti esmalt punktidega 10033 ja 11395 asfaldinaelaga kindlustatud ajutiselt punktilt, mis rajati punkti 375A lähedusse. Kuna tasandusarvutuses ilmnis punkti 11395 andmekogu koordinaatide suur kokkusobimatus mõõtmistulemustega, pikendati käiku KGV 1. järgu punktini 10005 ja punkt 11395 jäeti tasandusarvutuses kindelpunktide hulgast välja.



**Joonis 13.** Kombineeritud meetodil mõõtmine Jaama tänava punktil 10031. ◻ – kontrollitav geodeetiline märk, ● – võrgu RTK abil mõõdetud ajutine punkt

Kombineeritud meetodi puhul (joonis 13), kus ajutistele punktidele asetatud statiividele kinnitati esmalt GNSS seade võrgu RTK ja seejärel prismad tahhümeetriliseks mõõtmiseks, tuli arvestada linnakeskkonnas paratamatult ette tulevate piiravate asjaoludega – punktid tuli valida selliselt, et oleks nähtavus punktist 10031 ja horisont oleks võimalikult vaba võrgu RTK mõõtmiseks. Baasjooned võiksid olla pikemad ja nendevahelised nurgad ühtlasemad.

## **4.2. Geodeetiline märk 20087 Kopli tänaval**

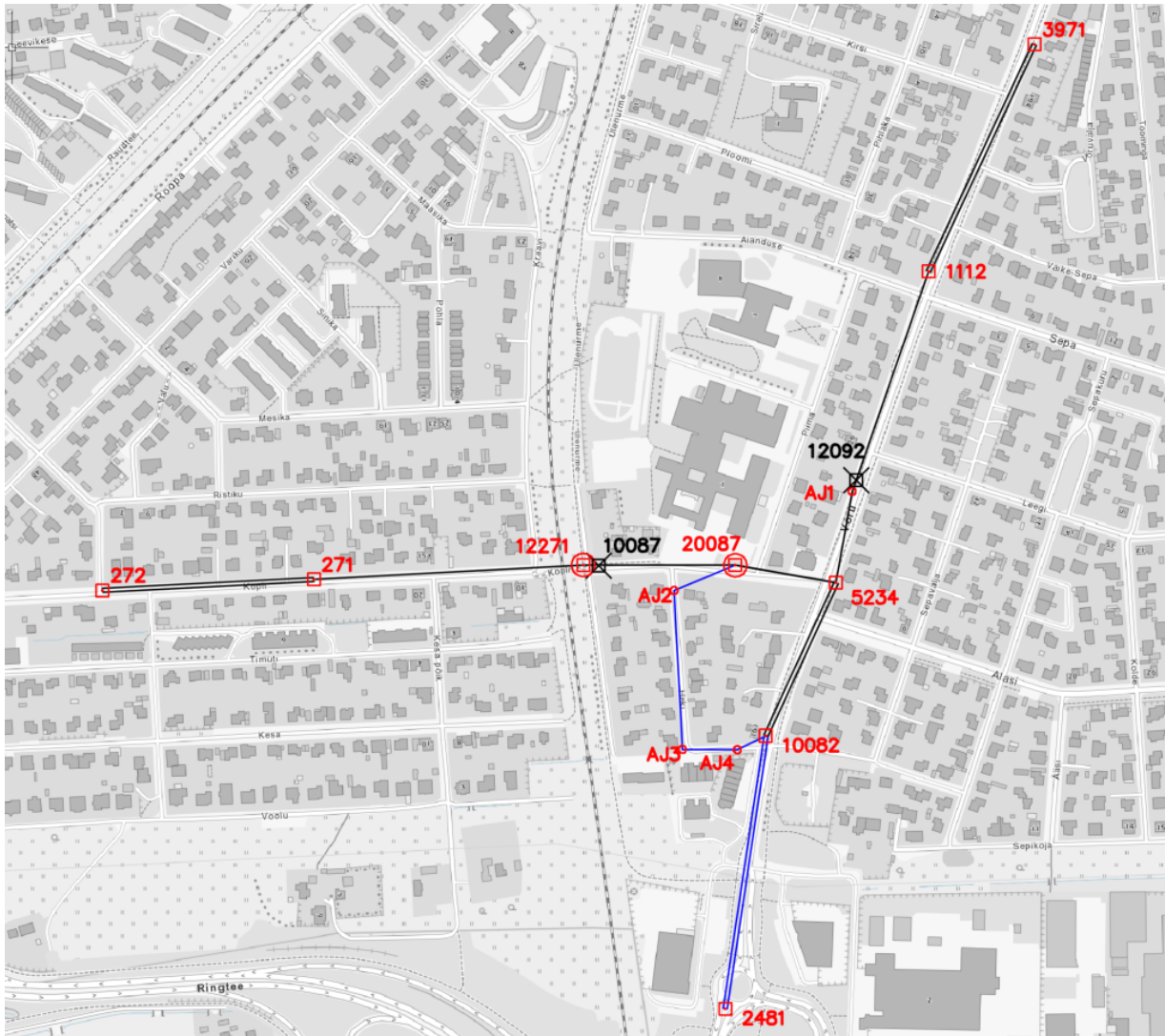
Geodeetiline märk 10087 Kopli ja Ülenurme tänava ristmikul jäi ette kergliiklustee rajamisel. Ümbertõstetud märk sai numbriks 20087 ja mõõdistuskäiku täiendati ajutise märgi – asfaldinaelaga, mis sai numbriks 12271 (joonis 14).

Varasem geodeetiline märk 10087 asus uue ajutise märgi piirkonnas, raudtee läheduses. Märgi uue asukoha valikul lähtuti maa-aluste kommunikatsioonide asukohast ja raudteemaa ulatusest. Mõõtmisele eelnevalt vaadati üle 10 geodeetilist märki, millest Võru tänaval asunud märk 12902 (asfaldinael) oli hävinud.

Kopli tänava geodeetilisel märgil tehti erinevatel aegadel järgmised mõõtmised:

- Polügonomeetiline mõõdistus 16.04.2020 ja 21.06.2020 (joonis 13);
- Staatile GNSS mõõdistus 19.07.2020 (joonised 15 ja 16);
- võrgu RTK mõõdistus 08.08.2020;
- vastulõike meetodil koordinaatide määramine uuritavale punktile võrgu RTK meetodil mõõdetud ajutistelt kindelpunktidele 21.06 (joonis 17).

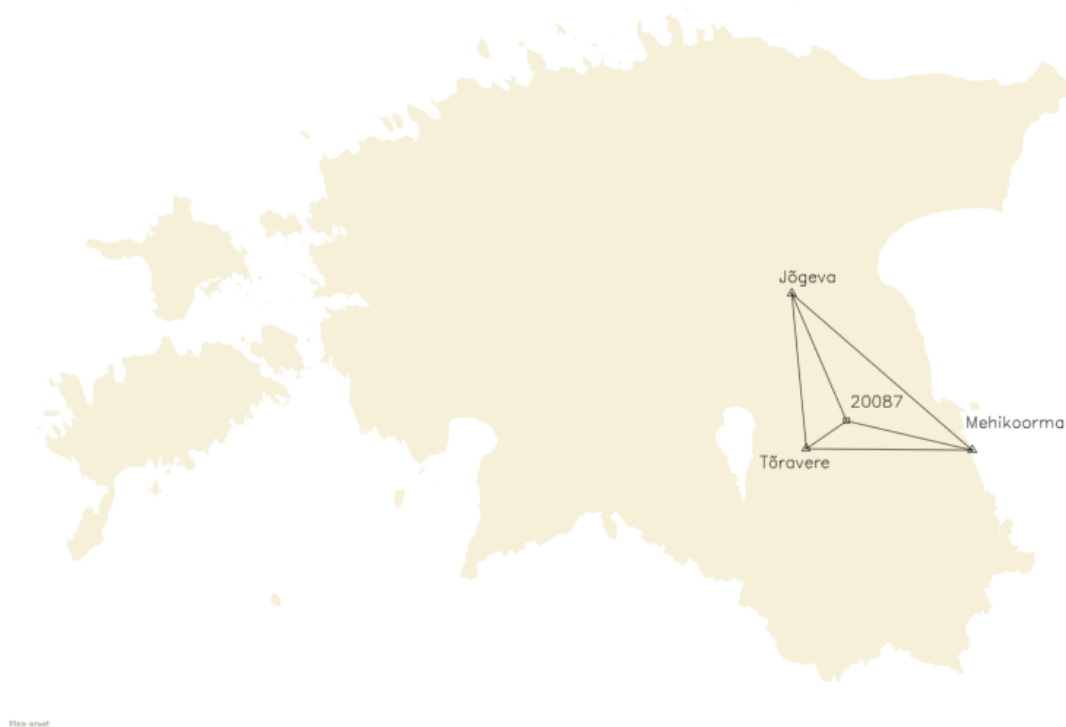
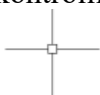
16.04.2020 mõõtmistel oli abiks Andres Tvauri, ülejäänud viis magistritöö autor läbi üksinda. Trigonomeetiline keskelt nivelleerimine oli punktile juba enne tehtud polügonomeetriakäigu mõõtmistest eraldi, kasutades lähtepunktideks kõrgusvõrgu punkte.



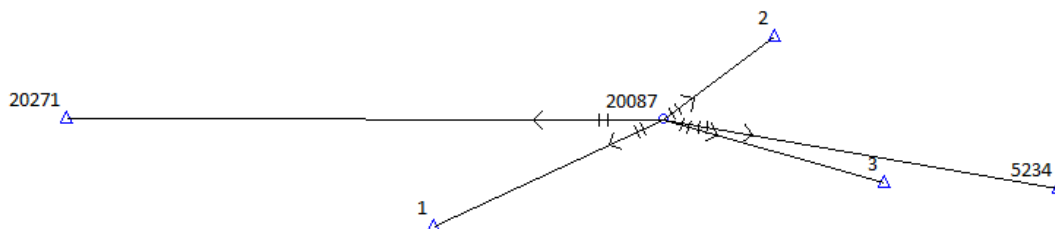
**Joonis 14.** Kopli tänava märgi asukoht ja polügonomeetriakäigu kuju ■ – olemasolev geodeetiline märk; ✕ – hävinud geodeetiline märk; ⊗ – paigaldatud, uus geodeetiline märk; ○ – ajutine punkt. Musta joonega esimese mõõtmispäeva käik, sinisega teise päeva oma. Aluskaart Maa-amet 2020



**Joonis 15.** Staatileine GNSS mõõdistus punktil 20087 kasutades tihendusvõrgu punkte ▣ – kontrollitav KGV punkt, ▴ – tihendusvõrgu punkt.



**Joonis 16.** Staatileine GNSS mõõdistus punktil 20087 kasutades Maa-ameti püsijaamade andmeid



**Joonis 17.** Lõigetega mõõtmine punktil 20087. Kolmnurgad tähistavad võrgu RTK meetodil mõõdetud kindelpunkte

Lõigetega mõõtmisel (joonis 17) pidi ajutiste punktide jaoks valima sellise asukoha, kus ühelt poolt oleks nähtavus punktile 20087 ja teisalt piisavalt avatud horisont, et RTK meetodil saaks nõutud täpsusega mõõta. Kaks ajutist punkti (20271 ja 5234) paigutati olemasolevatele kindelpunktidele, nende koordinaadid mõõdeti võrgu RTK meetodil. Hoonestus, haljastus ja parkivad autod seadsid ajutiste punktide asukohale rea piiranguid. Ka siin võiksid baasjooned olla pikemad ja nende vahelised nurgad ühtlasemad.

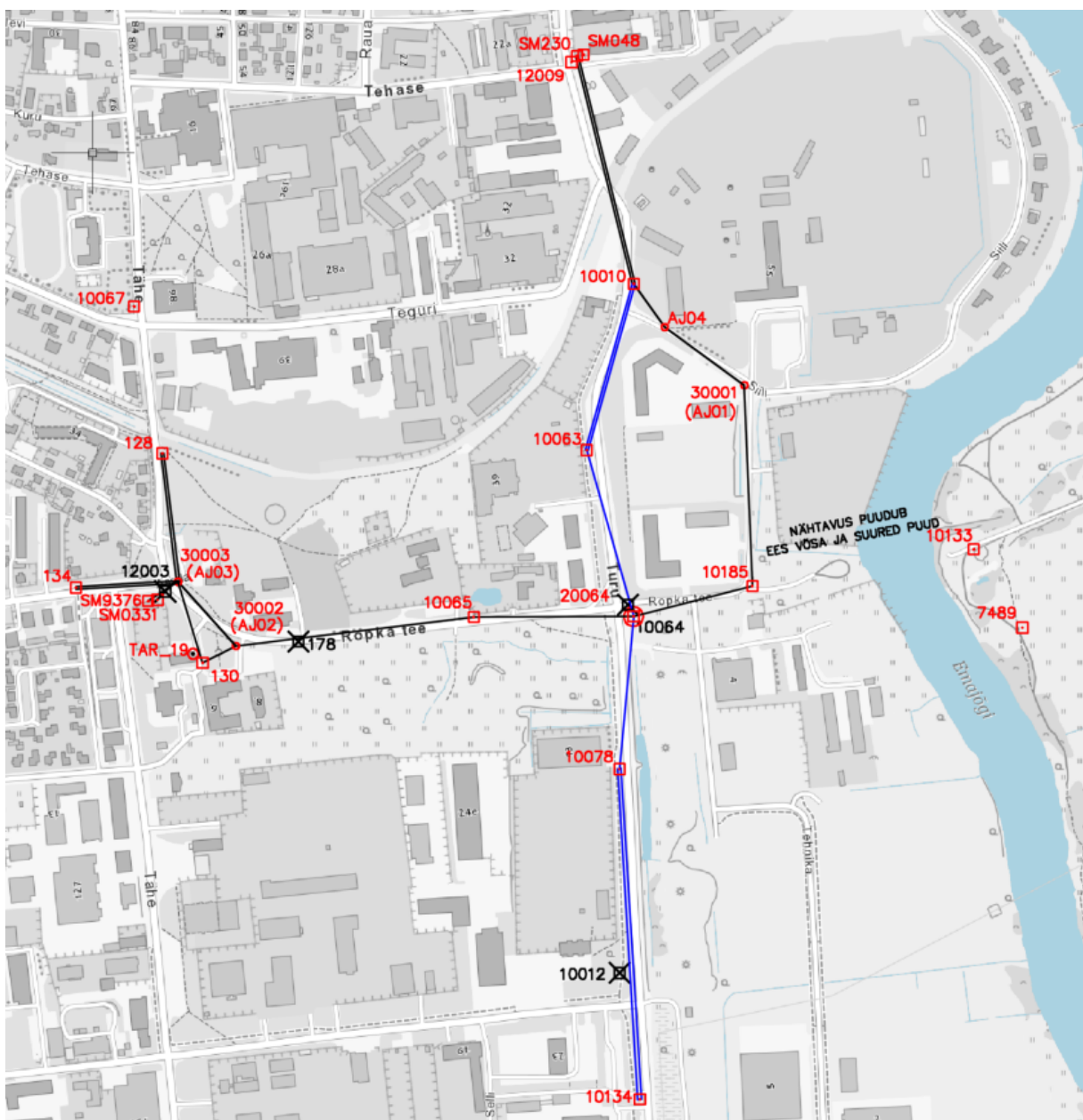
#### 4.3. Geodeetiline märk 20064 Turu ja Ropka tänavate ristis

Geodeetiline märk nr 10064 vajab ümbertõstmist Turu ja Ropka tänavate ristmiku rekonstrueerimise tõttu. Uus märk sai numbriks 20064. Uue punkti asukoha valikul lähtuti võimalikult heast nähtavusest kõigile neljale olemasolevale naaberpunktile (10063, 10185, 10078, 10065) (joonis 18). Kuna KGV rajamise käigus 2005. aastal on antud punkt olnud sõlmpunktiks, tuli ka praegusel mõõtmisel rajada ristuvate käikude süsteem.

Käikude süsteemi kuju on seotud sellega, et üle Emajõe ja läbi selle kallastel laiutava võsa ja suurte puude puudus nähtavus punktile 10133 ja sellelt omakorda polnud nähtavust ühelegi järgnevale punktile. Üsna lopsaka taimestikuga Emajõe vasakkalda luht on looduskaitseala



koosseisus ning vaatekiire rajamine alale oleks problemaatiline. Punkt 10010 on KGV 1. järgu punkt ja punktide 10078 ja 10134 vahel peaks olema teinegi 1. järgu punkt nr 10012, mis oleks taganud mõõtmiste sidumise rohkemate 1. järgu punktidega, aga see on hävinud.

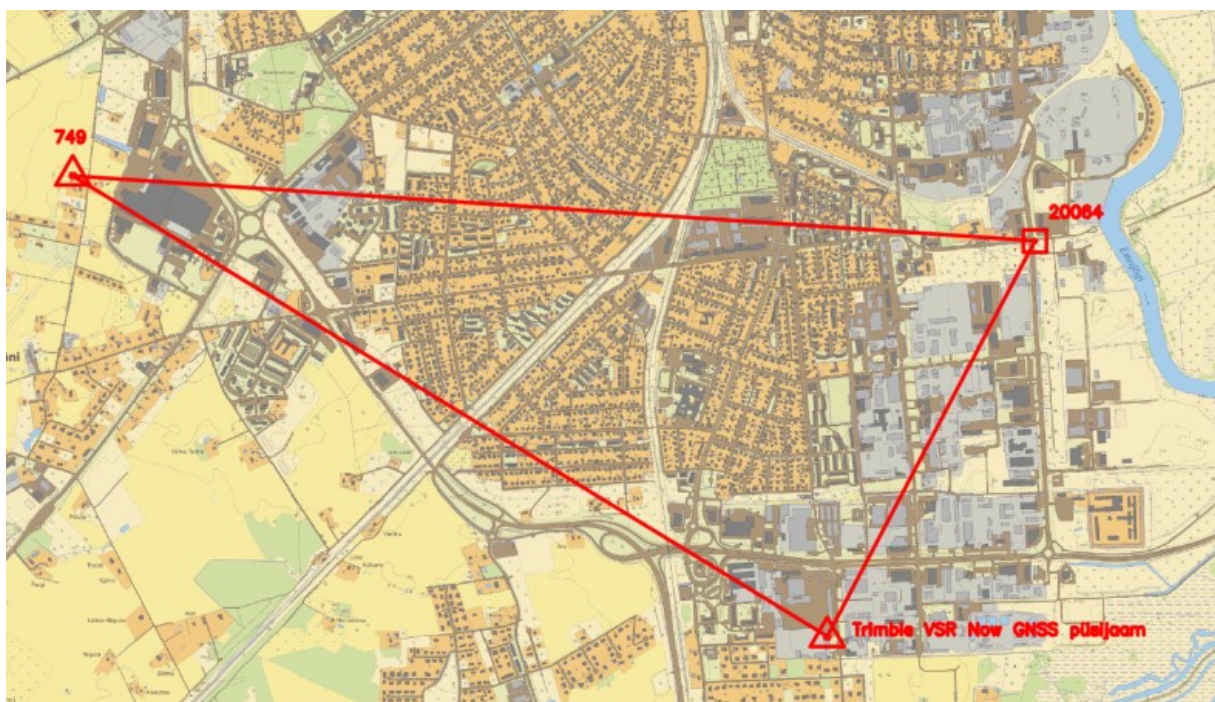


**Joonis 18.** Märki 10064 asukoht Turu ja Ropka tänavate ristmikul ja polügonomeetriakäigu kuhu □ – olemasolev geodeetiline märk; ✕ – hävinud geodeetiline märk; ⊙ – paigaldatud, uus geodeetiline märk; ○ – ajutine punkt. Käikude süsteemi erinevad osad on märgitud erineva värviga. Aluskaart Maa-amet 2020

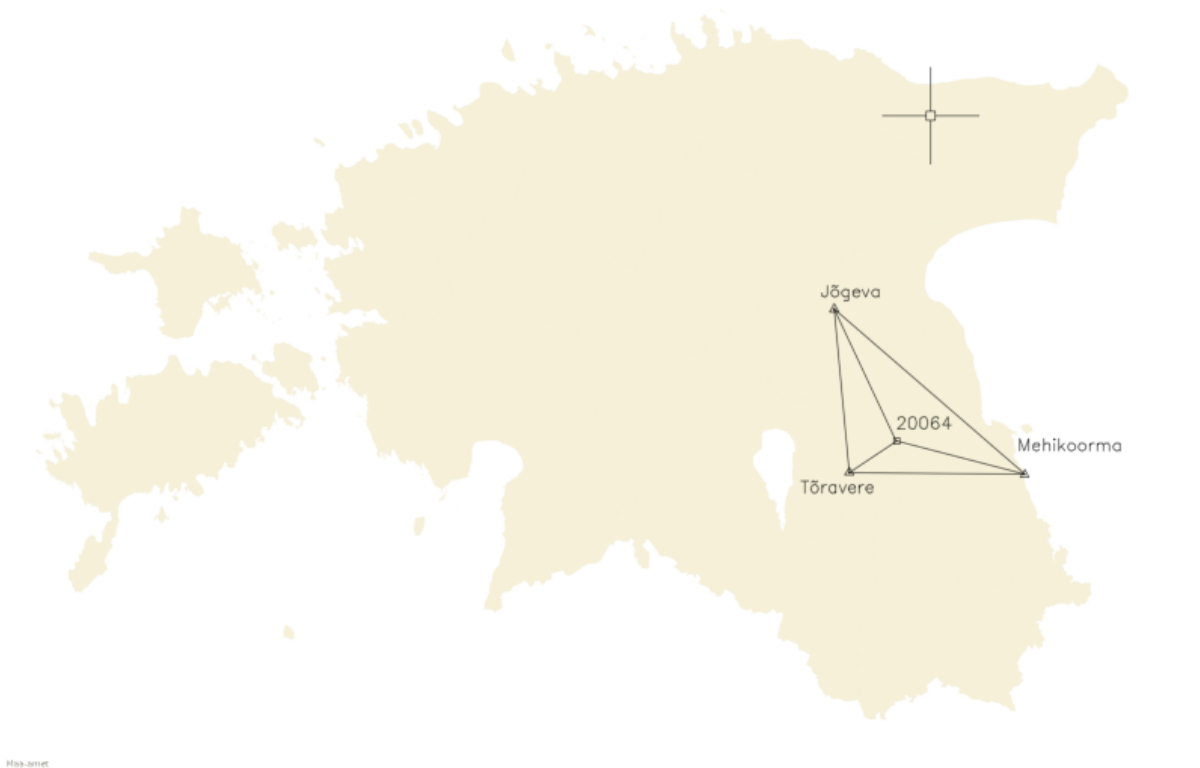
Mõõdistuste planeerimisel vaadati üle 14 geodeetilist märki, millest KGV 1. järgu punkt 10012, KGV 2. järgu punkt 12003 (asfaldinael) ja KGV 3. järgu punktid 0331 ja 178 olid hävinud.

Geodeetilisel märgi nr 20064 puhul viidi erinevatel aegadel läbi järgmised mõõtmised:

- Polügonomeetiline mõõtmine 16.-17.07.2020, 19.07.2020 (joonis 18);
- Staatile GNSS mõõtmine 12.07.2020 (joonised 19 ja 20);
- võrgu RTK mõõtmine 08.08.2020;
- vastulõike meetodil koordinaatide määramine uuritavale punktile olemasoleva KGV punktidele, kasutades nende 1) geodeetiliste punktide andmekogus olevaid koordinaate (02.07.2020) ja 2) võrgu RTK meetodil määratud koordinaate (08.08.2020).



**Joonis 19.** Staatile GNSS mõõdistus punktil 20064 kasutades tihendusvõrgu punkte ▣ – kontrollitav KGV punkt, ▴ – tihendusvõrgu punkt. Aluskaart Maa-amet 2021



**Joonis 20.** Staatiline GNSS mõõdistus punktil 20064 kasutades tihendusvõrgu punkte. Aluskaart Maa-amet 2021

Tahhümeetriamõõtmistel (02.07.2020 ja 16.–17.07.2020) osales Janno Vään, ülejäänud tegi töö autor ise. Polügonomeetriadõõtmistega koos mõõdeti ja arvutati punktitele ka kõrgus, aga kuna punkt 10064 oli kõrguse saanud 2. klassi nivelleerimisega, tuleb uuele punktile sama meetodikaga nivelleerimine teostada peale vajumistsükli sügis-kevad-talv möödumist.

Lõigetega mõõtmisel oli võimalik kasutada olemasolevaid KGV punkte, millele määrati uued koordinaadid võrgu RTK meetodil. Võrreldes teiste kahe punktiga, kus vastulõike ja võrgu RTK abil mõõdetud ajutiste kindelpunktidega kombineeritud meetodit kasutati, said KGV punktid 10063, 10185, 10078, 10065 võrgu RTK abil mõõdetud koordinaadid tahhümeetriamõõtmisest eraldi ja mõõtmisel kasutati fikseeritud kahemeetrist sauja ja sauahoidjat. Tänu olemasolevate KGV punktide ärakasutamisele olid baasjooned ühtlase pikkusega ja nendevahelised nurgad samuti ühtlased, kuid punktide 10065 ja 10078 juures oli raskusi seadmesse sisestatud hinnangulise mõõtetäpsuse (2 cm) saavutamisega.



#### 4.4. Mõõtmistele kulunud aeg ja üldised täpsust mõjutanud asjaolud

Magistritöö jaoks tehti mõõtmised läbi reaalelulises situatsioonis ning kulunud aeg ja saavutatud täpsused sõltusid paljudest erinevatest faktoritest. Polügonomeetria mõõtmistel olid olulisemad mõõtmistingimused (ilm ja liiklus) ning lähtepunktide kvaliteet. Turu ja Ropka tänavate risti mõõtmisel näiteks langesid mitmed ebasoodsad asjaolud kokku – mõõtmispäevad olid palavad ja päikeselised, hoolimata sellest, et püüdsime hoolega võimalikult soodsat ilma valida, liiklus oli tihe ja lähtepunktide kvaliteet kohati samuti küsitav. Satelliitmõõtmiste puhul mõjutavad satelliitide arv ja PDOP, aga siin sõltub mõõtmistulemus ka reast paranditest ja täpsustustest, mis võivad jääda hoomamatuks (iono- ja troposfääri parand, antennide kalibreerimise andmed, täpsed efemeriidid). Mõõtmistele kulunud aeg on toodud tabelis 5.

**Tabel 5.** Erinevatele mõõtmismeetoditele välitöödeks kulunud aeg

Meetod	Ühe KGV punkti mõõtmisele kulunud aeg	Vajalikud töövahendid	Vajalik tööjõud
GNSS võrgu RTK	2 tundi ja 45 minutit	Statiiv, treeger ja adapter või sau ja sauahoidja, võrgulitsentsiga RTK GNSS. Järeltöötlustarkvara pole vaja	1 inimene
Lõigete meetod, kombineeritud võrgu RTK ja tahhümeetiline mõõtmine	2 tundi koos GNSS seadme kontrolliga KGV punktil enne ja pärast mõõtmist	5 statiivi, 5 treegerit ja 4 prisma, võrgulitsentsiga RTK GNSS seade, tahhümeeter. Järeltöötlustarkvara.	1 inimene
Staatiline GNSS mõõtmine	3 tundi ja 30 minutit, GNSS püsijaade andmeid kasutades. Lõplik aeg sõltub kasutada olevate GNSS seadmete arvust ja võrgu ülesehitusest	Vähemalt 1 GNSS antenn ja vastuvõtja, enamikel juhtudel 2 või rohkem; püsijaamade andmete kättesaadavus. Järeltöötlustarkvara.	1 inimene
Polügonomeetria	Instrumendi aklimatiseerumiseks 1 tund + 20–30 minutit jaama kohta, minimaalse käigu pikkuse korral (3 jaama) u 2 tundi. Lõplik aeg sõltub lähtepunktide asukohast ja käigu pikkusest	Vähemalt 3 statiivi, 3 treegerit ja 2 prisma. Sõlmpunktidega käikude korral enam. Järeltöötlustarkvara	Min 1, optimaalsem 2

Tuleb arvestada, et tabelis toodud absoluutne miinimumaeg kulub vaid võrgu RTK ja lõigete meetoditel mõõtes, teiste meetodite puhul on enamasti vaja täpsuse ja kontrollitavuse suurendamiseks teha rohkem kui vaid minimaalsed mõõtmised.

Üllatavalt kaua aega võttis **GNSS võrgu RTK mõõtmine** otse punktil. Kuna tegemist on üsna ebamäärase tulemusega mõõtmisviisiga, pidasin oluliseks teha instrumendi kontrolli riikliku võrgu punktil. Tartule lähima RGV II klassi punkti peal seadme kontrollimine enne ja pärast mõõtmist ning kahe mõõteseria läbi viimine nii uuritaval punktil kui mõõdistusalas asuval kontrollpunktil vähemalt kolmveerandtunniste vahedega muutsid protsessi ligi kolme tunni pikkuseks. Arukas on enne mõõtmaminekut kasutada mõnd mõõtmiste planeerimiseks mõeldud tarkvara, aga lõplik kättesaadavate satelliitide arv ja PDOP selgub siiski koha peal. Kui seadme initsialiseerimisele kulub tavapärasest rohkem aega, viitab see suure tõenäosusega ka sellele, et mõõtmistulemuse täpsus pole kiita (Häkli 2004) ja sellistes oludes tuleks kindlasti mõõtmisest loobuda. Andmete järeltöötlusele kulunud aeg on võrreldes teiste meetoditega tühine.

**Lõigete meetod** on suhteliselt kiire, sest mõõtmisi teostatakse ainult ühes jaamas. Kuni tahhümeeter välistemperatuuriga kohaneb, on võimalik üles panna statiivid, mõõta mitmekordse initsialiseerimisega lähtepunktid, panna paika prismad ning tunni ja veerandi pärast asjad kokku pakkida. Lisaks kulub aega GNSS seadme kontrollile enne ja pärast mõõtmist. Lõigete meetodi miinuseks on see, et linnakeskkonnas võib olla keerukas leida soodsat asukohta neljale-viiele ajutisele kindelpunktile, eriti kui tänavatevõrgu kuju seda ei soosi.

Kõige enam võtab aega **staatiline mõõtmine**, aga selle juures on geodeedi aktiivne panus üsna väike. GNSS vastuvõtja üles seadmine, kõrguse mõõtmine ja mõõtmiste alustamine võtavad kokku aega 10-15 minutit. Kui jaamu on rohkem, kulub aega järgmise asukohta sõiduks ja seal seadme ülespanekuks ja mõõtmise alustamiseks. Satelliitmõõtmisi plaanisin ja viisin läbi nii väikeses mahus, et seejuures oli andmetöötlemine osa üsna väike.

**Polügonomeetria mõõtmiste** ajakulu on seotud lähtepunktide kaugusega ja mõõtmisjaamade hulga. Aja jooksul kasvasid minu oskused ja vilumus ja kui esimesel mõõtmisel Kopli tänaval kulus mul üksinda kuue jaama mõõtmiseks enam kui kaheksa tundi, siis hiljem kulus ühe jaama peale üksi keskmiselt pool tundi ja kahekesi umbes kakskümmend minutit. Sellele eelnes instrumendi aklimatiseeruda laskmine, esimeste statiivide ülespanek ning protseduurilised

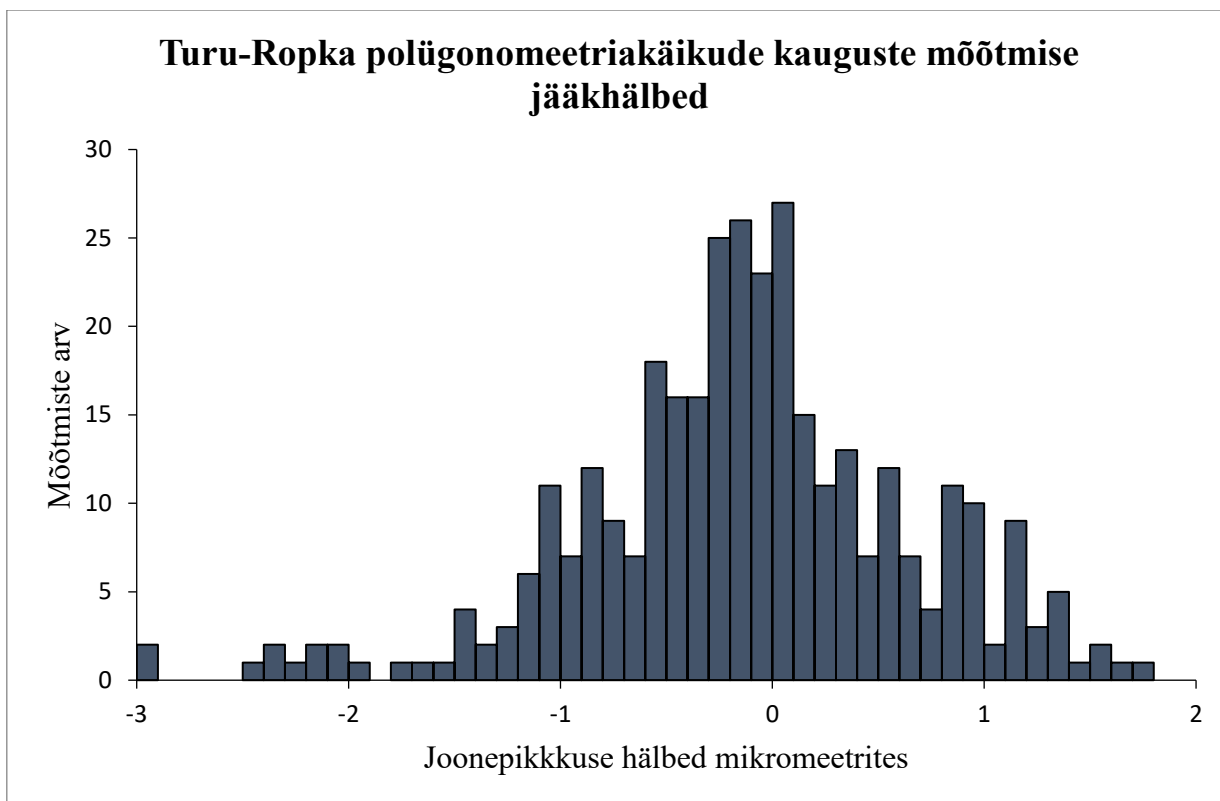
kontrollid tahhümeetri tarkvara abil. Nii kiiresti ja ladusalt saab mõõtmine minna ainult juhul, kui eeltööd on korralikult tehtud ja mõõtmispäeval ei tule enam ette üllatusi.

Kameraalarvutuste koha pealt oli polügonomeetria-andmete töötlemine kõige ajamahukam. Peale mõõtmisandmete GEO programmi toomist oli vaja kõikidele jaamadele käsitsi ja ükshaaval sisestada ilmastiku parandid ilmajaama mõõtefailist. Jämedate vigade eemaldamine käis ükshaaval, siis tasandust uuesti tehes, kuni kõik jämeda veaga tulemused olid eemaldatud. Kui vaba tasanduse arvutustel tulid punktidele suured nihked, oli oodata suurt kaaluühiku standardhälvet seotud tasanduses ja pidi seotud tasanduses oletatavalt vigaste koordinaatidega jaamu järjest välja jätma ja uuesti tasandama, kuni vigane jaam leitud ja selle tuntud punktide hulgas välja jätma ja talle uued koordinaadid arvutama.

Suuremad probleemid tulidki arvutustes ette seoses lähtepunktide kokkusobimatusel, kuigi vigu esines loomulikult ka mõõtmistes.

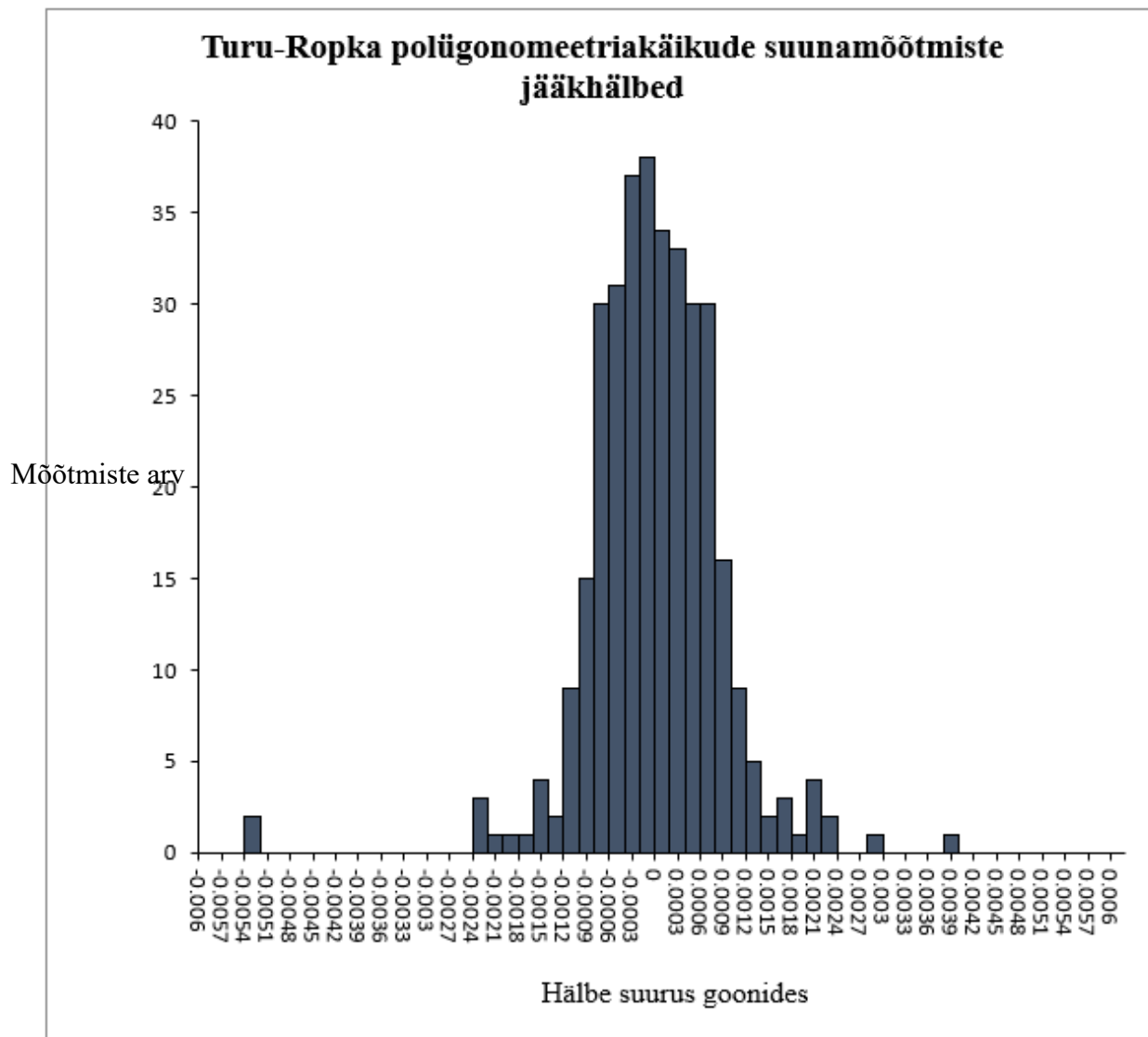
Turu ja Ropka tänavate ristmikus, kus tegime sõlmpunktiga käigu pikalt kahes ristuvast suunas, tegin samade polügononomeetriamõõtmise andmetega läbi mitu erinevat tasandust, et demonstreerida, kui erinevad võivad tulemused olla vastavalt kasutatavatele lähtepunktidele ja käigu ülesehitusele. Lisaks võrgu geomeetria mängib olulist rolli lähtepunktide kvaliteet. Ei olnud võimalik teha sellist seotud tasandust, kus kõik neli erinevates suundades punkti 20064 ümbritsevad KGV punktid oleks kindelpunktidenä veatuteks loetud ja kaaluühiku standardhälve oleks püsinud ootuspärastes piirides. Paraku ei ole ka meie mõõtmistulemused seal kõige eeskujulikumat, nii et seegi mõjutab lõpptulemust.

Mõõtmistulemuste hindamiseks tegin nii suuna- kui kaugusemõõtmise hälvetest histogrammid. Histogrammide jaoks panin kokku kõik andmed kõikidest erinevatest polügonomeetriamõõtmistest, teadaolevaid jämedaid vigu enne eemaldamata (joonised 21 ja 22). (Hilisemates arvutustes need mõistagi eemaldati.) On näha, et hälvete histogrammid ei ole sümmeetrilised. Nagu sissejuhatav peatükis põgusalt vaatasime, peab normaalajotuses pluss- ja miinusmärgiga vigu olema võrdselt, aga meie mõõtmistes oli miinusmärgiga jääkhälbeid rohkem nii suuna kui kauguse mõõtmiste tulemuste hulgas ja see annab põhjuse otsida süsteemset viga. Kuna mõõtmised on tehtud täisvõtetega, siis peaks kollimatsiooni- ja inklinatsioonivea mõju olema elimineeritud. Enne mõõtmaasumist tehti tahhümeetrile protseduurilised kontrollid. Kontrollitud olid ka treegerid.



**Joonis 21.** Geodeetise märgiga nr 20064 seotud kõikide kaugusemõõtmiste jääkhälbed

Tahhümeetri valgusmõõduri kontrolli ja prisma konstandi määramise käigus Vääna polügoonil nägime, et üks meie neljast kaasasolnust prismast esines teistest oluliselt halvemini, lugemite hajuvus oli sellele mõõtes kordades suurem kui teistega. Kalibreerimisarvutuse tulemusi me siiani veel ei tea. Kauguse mõõtmise hälbed on siiski väiksed, nulli ümber, suurim nende hulgas -0,003 mm.



**Joonis 22.** Geodeetise märgiga nr 20064 seotud kõikide suunamõõtmiste hälbed.  $1'' = 0,003$  gon.

Suunamõõtmise jääkhälvete hulgas torkavad kohe silma kolm jämedat viga histogrammi äärealadel. Kaks miinusmärgiga jääkhälvet on rohkem kui 15 sekundi suurused ja kaks plussmärgiga viga 10–12 sekundit. Enamasti on selliste tegemist väljas võimalik edukalt vältida, nii suure veaga tulemust lihtsalt mitte salvestades. Kui aga välitingimustest tulenev viga on mõjutanud kõige esimest antud suunale mõõtmist, võib juhtuda, et esmalt poolvõtete ja siis kahe erineva täisvõtte vahel ei saavutagi soovitud täpsust ja mõõtmine tuleks teha algusest peale uuesti.

## 4.5. Tulemused ja analüüs

Järgnevalt esitan leitud koordinaadid ja nende täpsushinnangud üksikute geodeetiliste punktide kaupa ja analüüsin põgusalt saadud tulemusi. Eraldi vaatlen võrgu RTK mõõtmisi kõikide punktide puhul. Lõplikud järeldused leiab altpoolt arutelu peatükist. Kõik standardhälbed on esitatud 95% tõenäosusega. Programm TBC väljastab vaikumisi tulemused just sellise tõenäosusega (kuigi soovi korral saab seda seadistustega muuta), SBG Geo kasutab  $1\sigma$  väärtust. Tasandusaruandes on välja toodud standardhälbe reaalne jaotus ja selle võrdlus teoreetilisega (vt näide tabel 6).

**Tabel 6.** Standardhälbe jaotumine mõõtmistulemuste hulgas. Väljavõte SBG Geo võrgutasandusaruandest

Sigma level: Sigma tase	Value Väärtus	No of observations Vaatluste arv	Accumulated (%) Vaatlustest kogunenud	Theoretical (%) Teoreetiline
1	0.0 - 1.0	433	73.89	68.08
2	1.0 - 2.0	126	95.39	95.65
3	2.0 - 3.0	14	97.78	99.71
3+	3.0 -	13	100	100
?	no valid value/kehtivat väärtust pole	0	100	

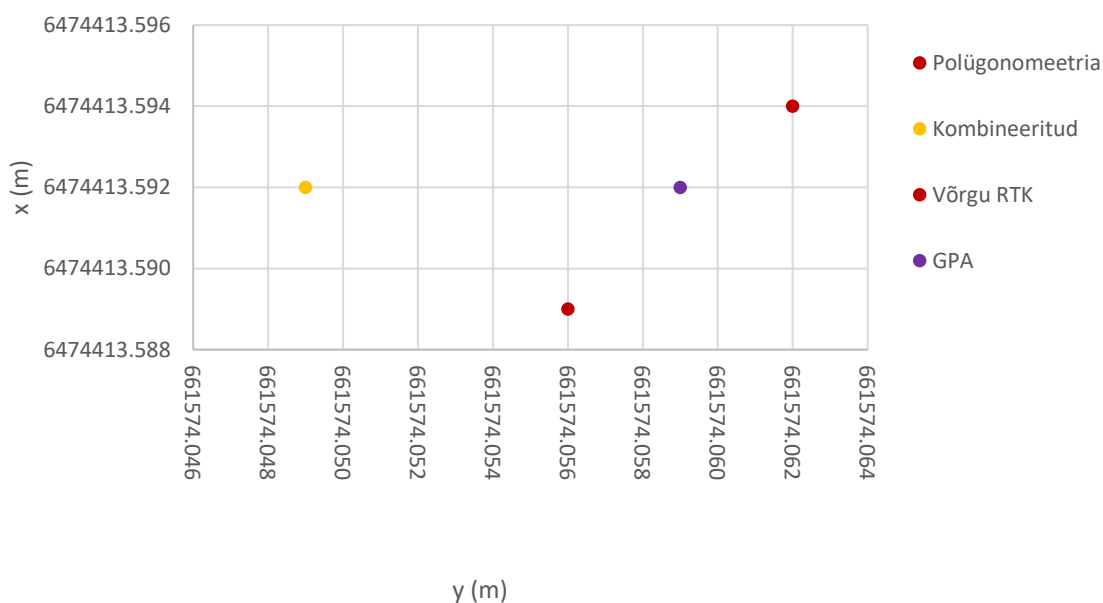
Et saada võrreldavaid tulemusi, korrutasin SBG Geo programmi väljastatud väärtused ja Exceli programmis funktsiooni STDEV abil leitud standardhälbed  $1\sigma$  tasemel läbi 1,96.

### 4.5.1. KGV punkt 10031

KGV punkti 10031 puhul on tulemusi (joonis 23, tabel 7) kõige lihtsam hinnata – siin on olemas GPA andmed, millega saadud tulemusi võrrelda.

**Tabel 7.** Geodeetilise märgile nr 10031 erinevatel meetoditel arvutatud koordinaadid ja nende standardhälbed (95% tõenäosusega)

Mõõtmismeetod	X (m)	Y (m)	$\sigma X$ (m)	$\sigma Y$ (m)
Polügonomeetriakäik	6474413,594	661574,062	0,0012	0,0012
Võrgu RTK-mõõtmine	6474413,589	661574,056	0,0168	0,0151
Kombineeritud mõõtmine joonelis-nurgalise vastulõikega: lähtepunktid RTK, tasandus elastne	6474413,592	661574,049	0,0059	0,0039
Punkti koordinaadid GPA-st	6474413,592	661574,059		



**Joonis 23.** Punkti 10031 erinevatel meetoditel leitud koordinaatide paiknemine graafiliselt

Kõikide mõõtmiste tulemused ja nende standardhälbed mahuvad KGV puhul lubatud  $\pm 2$  cm piiridesse 95% tõenäosusega, RTK mõõtmine küll väga napilt. Seejuures saadud koordinaatide vahed on väiksed ( $\Delta X = -0,003$ ;  $\Delta Y = -0,003$ ), aga võrgu RTK mõõtmiste standardhälve suur.

Vaatame, kas saadud tulemused on statistiliselt erinevad. Seda saab teha kahepoolse z-testi abil, millega võrreldakse kaht keskväärtust teadaolevate dispersioonide korral. Exceli protseduuriga

*z-Test: Two Sample for means* võrreldi erinevatel meetoditel saadud koordinaate nende dispersioonide (standardhälbe ruutude) põhjal. Kuna punktil 10031 on vaid kolm koordinaadipaari, tehti kahepoolne z-test läbi kõikides kombinatsioonides. Allpool (tabel 8) on kahepoolne z-test lahti seletatud polügonomeetria ja võrgu RTK meetodil leitud X-koordinaatide näitel.

**Tabel 8.** Exceli protseduur *z-Test: Two Sample for Means* kahe koordinaadi võrdlemiseks.

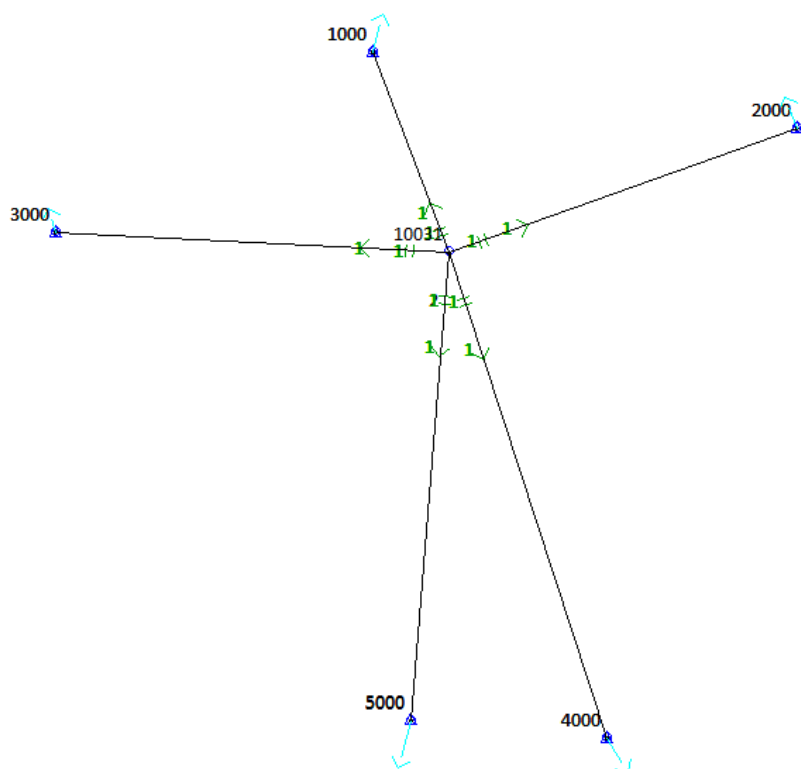
	<i>Polügonomeetria</i>	<i>RTK</i>	<i>Selgitus</i>
Mean	6474413,594	6474413,589	Keskmine väärtus
Known Variance	0,00000138	0,000284	Teadaolev dispersioon
Observations	1	1	Vaatluste arv
Hypothesized Mean Difference	0		Hüpoteetiline keskmiste vaheline erivus
z	0,29597718		z-statistiku väärtus
P(Z<=z) one-tail	0,383623754		Ühepoolsele hüpoteesile vastav p-väärtus
z Critical one-tail	1,644853627		Ühepoolsele hüpoteesile vastav z-statistiku kriitiline väärtus
P(Z<=z) two-tail	0,767247509		Kahepoolsele hüpoteesile vastav p-väärtus. Kui see on väiksem kui valitud olulisuse nivoo (95%=0.05) , siis on kaks koordinaati statistiliselt oluliselt erinevad
z Critical two-tail	1,959963985		Kahepoolsele hüpoteesile vastav z-statistiku kriitiline väärtus. Kui z-statistik > z-kriitiline, siis on koordinaatide erinevus statistiliselt oluline

Ühelgi juhul polnud kahepoolsele hüpoteesile vastav p-väärtus väiksem kui 0.05 ja z-statistik jäi väiksemaks z-kriitilisest väärtusest, seega pole punktile 10031 saadud koordinaadid omavahel statistiliselt oluliselt erinevad.

Vaatame ka veaellipseid ja nende suundasid (tabel 9, joonis 24). Veaellipsi suuna määrab pikema pooltelje suund (põhjasuuna suhtes) ja see näitab, mis suunal andmed enim varieeruvad. Lühem pooltelg on pikema poolteljega risti. Veaellipsi suund, suurus ja kuju sõltuvad 1) kontrollpunktidest, 2) vaatluste täpsusest ja 3) võrgu geomeetriast (Wolf ja Ghiliani 2006:381). Ideaaljuhul on kõik veaellipsid ringikujulised ja ühesuursed. Polügonomeetriakäikude mõõtmisel (kasutades nurki, joonepikkusi ja asimuute) kehtivad järgmised seaduspärad:



1. Joonepikkuste mõõtmised tugevdavad punkti asendit mõõdetud joone suunas.
2. Nurga ja asimuutide mõõtmine tugevdab punkti asendit viseerimiskiirega ristisuunas (samas: 382).



**Joonis 24.** Veallipsid ja lähtepunktide nihked kombineeritud mõõtemetodi puhul programmi SBG Geo graafilises vaates

**Tabel 9.** Veallipsite telgede pikkused ja suunad punkti 10031 mõõtmistel

Mõõtmismeetod	Pikem pool- telg (m)	Lühem pool- telg (m)	Veaallipsi suund
Polügonomeetriakäik	0,0012	0,0012	2°
Kombineeritud mõõtmine joonelis-nurgalise vastulõikega: lähtepunktid RTK, tasandus elastne	0,0039	0,0059	81°

Punkti 10031 on puhul polügonomeetriamõõtmise veaallips sümmeetriline ja ühtib enam-vähem koordinaatsüsteemi teljestiku suunaga. Polügonomeetriakäik oli sirge, enam-vähem idalääne suunaline. Veaallipsi kuju ja suurus näitavad, et tasanduses kasutatud kindelpunktide täp-

sususklass oli võrdne ja nad sobisid hästi kokku ja ka mõõtmiste täpsus oli hea. Kombineeritud mõõtmise veaellips on ebasümmeetriline. See on üllatav, kuna kasutati elastset tasandust, mis peaks lähtepunktide kõikuvast kvaliteedist tulenevate vigade mõju tasa lülitama. Kombineeritud mõõtmisel ei tulnud aga sugugi välja vaba tasandus – SBG Geos ette nähtud 10 lähenduse käigus ei jõutud usaldusväärse tulemuseni.

Elastse tasanduse järgselt arvutas SBG Geo programm lähtepunktile põhja-lõunasuunal suurema nihked kui ida-lääne suunal (joonis 22). Mõõtmiste hulgas oli suure standardiseeritud hálbega tulemusi erakordselt vähe. Ilmselt on küsimus lähtepunktide kvaliteedis.

#### 4.5.2. KGV punkt 20087

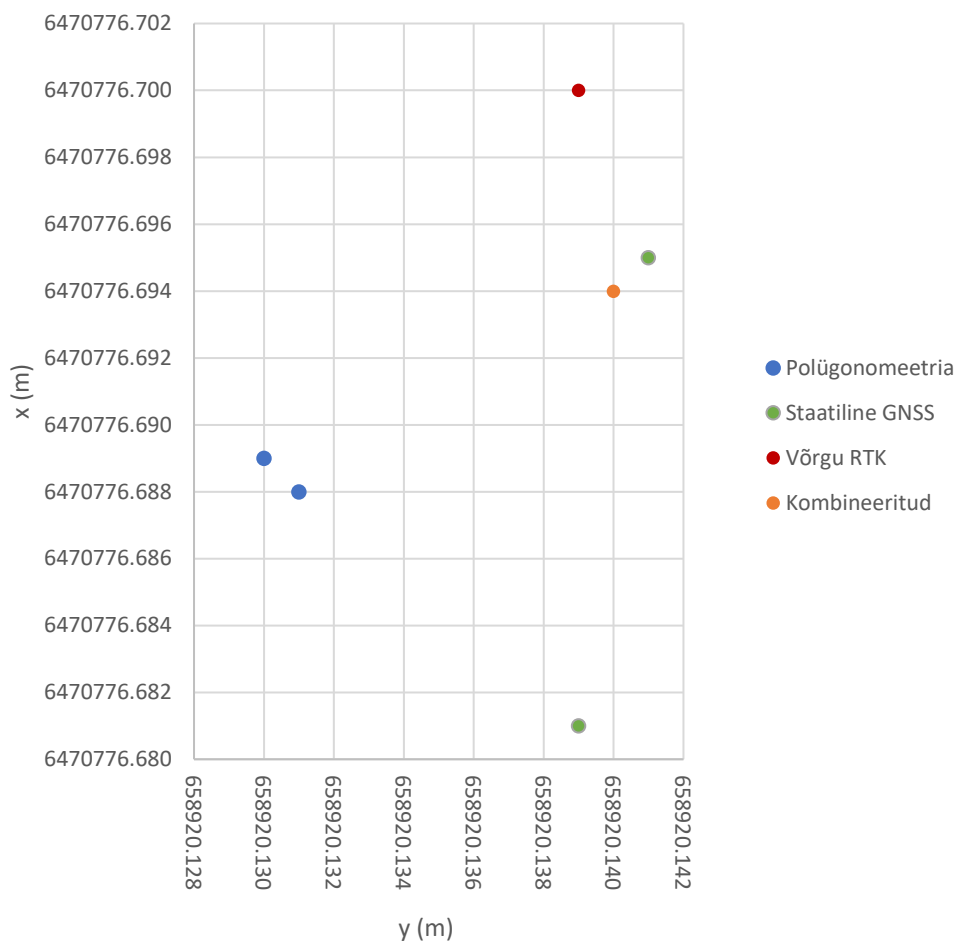
Erinevalt kontrollmõõtmistest punktide teisaldamisel võrdlust teadaolevate koordinaatidega ei saa teha, parim tulemus punkti 20087 puhul selgub vaadates veahinnanguid ja veaellipsite suundasid (tabel 10 ja 11).

**Tabel 10.** Geodeetilise märgile nr 20087 erinevatel meetoditel arvutatud koordinaadid ja nende standardhálbed (95% tõenäosusega)

Mõõtmismeetod	X (m)	Y (m)	$\sigma_X$ (m)	$\sigma_Y$ (m)
Polügonomeetriakäik I	6470776,688	658920,131	0,0014	0,0012
Polügonomeetriakäikude süsteem. kus sõlmpunkt uuritaval punktil	6470776,689	658920,130	0,0010	0,0009
Staatiline GNSS mõõtmine I : mõõtmine punktil 20087. kasutatud Maa-ameti püsijaamu	6470776,681	658920,139	0,0042	0,0035
Staatiline GNSS mõõtmine II: vastuvõtja punktil 20087. tihendusvõrgu punktidel 749 ja 5031 (Trimble püsijaam)	6470776,695	658920,141	0,0010	0,0008
Võrgu RTK-mõõtmine	6470776,700	658920,139	0,0223	0,0263
Kombineeritud mõõtmine joonelis-nurgalise vastulõikega: lähtepunktid RTK ja elastne tasandus	6470776,694	658920,140	0,0154	0,0154

Punkti 20087 puhul on parema täpsushinnanguga tulemused saadud 1) sellise polügonomeetriakäigu mõõtmisel, mille üks sõlmpunkt on uuritaval punktil ja 2) lühemate

baasjoontega staatilisel mõõdistusel, kus kasutati kahte EMÜ GNSS vastuvõtjat ja Trimble'i Tartus asuvat püsijaama. Punktide koordinaadid erinevad 6 mm põhja-lõuna suunal ja 11 mm ida-lääne suunal, aga täpsushinnangud on väga sarnased. Kahepoolse z-testi abil punkte võrreldes selgub, et erinevus on statistiliselt oluline.



**Joonis 25.** Punkti 10087 erinevatel meetoditel leitud koordinaatide paiknemine graafiliselt. Küllalt suured standardhälbed iseloomustavad punkti 20087 puhul kombineeritud mõõtmist. Koordinaatide väärtus on sarnane lühikeste baasjoontega GNSS mõõtmise tulemustele ja need tulemused ei ole omavahel ka statistiliselt erinevad. Statistiliselt erinev on aga kahe staatilise mõõtmise X-koordinaadi väärtus. Y-koordinaadi osas paistab süstemaatiline nihe KGV-le toetuva polügonomeetria ja GNSS-põhiste meetodite vahel (joonis 25).

Veaellipsite suurused ja suunad on üsna erinevad (tabel 11). Kombineeritud mõõtmise korral on veaellips ainsana sümmeetriline, kuid võrreldes teiste meetoditega palju suurem. Polügonomeetria-mõõtmiste puhul avaldub selles erinevuses ilmselt võrgu geomeetria roll.

**Tabel 11.** Veaellipsi suunad ja telgede pikkused punkti 20087 mõõtmisel

Mõõtmismeetod	Pikem pooltelg (m)	Lühem pooltelg (m)	Veaellipsi suund
Polügonomeetriakäik I	0,0014	0,0012	178°
Polügonomeetriakäikude süsteem, sõlmpunkt uuritava punktil	0,0010	0,0008	16°
Staatiline GNSS mõõtmine I : mõõtmine punktil 20087, kasutatud Maa-ameti püsijaamu	0,0067	0,0043	4 °
Staatiline GNSS mõõtmine II: vastuvõtjad punktil 20087, tihendusvõrgu punktidel 749 ja 5031 (Trimble püsijaam)	0,0047	0,0036	168 °
Kombineeritud mõõtmine joonelis-nurgalise vastulõikega: lähtepunktid RTK ja elastne tasandus	0,0154	0,0154	122 °

Hindamaks, kuidas GNSS staatilise mõõtmise abil koordinaadid saanud punkt olemasolevasse võrku sobituks, tegin läbi arvutuse, kus lugesin punkti 20087 kindelpunktiks (koordinaadid II staatiline GNSS) ja arvutasin uued koordinaadid ümbritsevatele olemasolevatele KGV punktidele 5234 ja 271 (tabel 12).

**Tabel 12.** Koordinaadid, nende erinevused ja standardhälbed punktidele 271 ja 5234, kui 20087 on loetud kindelpunktiks

Punkt	X <sub>GPA</sub> (m)	y <sub>GPA</sub> (m)	X <sub>arvutatud</sub> (m)	y <sub>arvutatud</sub> (m)	$\Delta x \pm \sigma_x$ (m)	$\Delta y \pm \sigma_y$ (m)
271	6470761.990	658483.543	6470761.997	658483.543	0.007±0,0008	0±0,0008
5234	6470758.445	659024.381	6470758.45	659024.391	0.008±0,0007	0.01±0,0007

Saadud erinevus mahub KGV 2. järgu punkti nõutud täpsuse piiresse.

#### 4.5.3. KGV punkt 20064

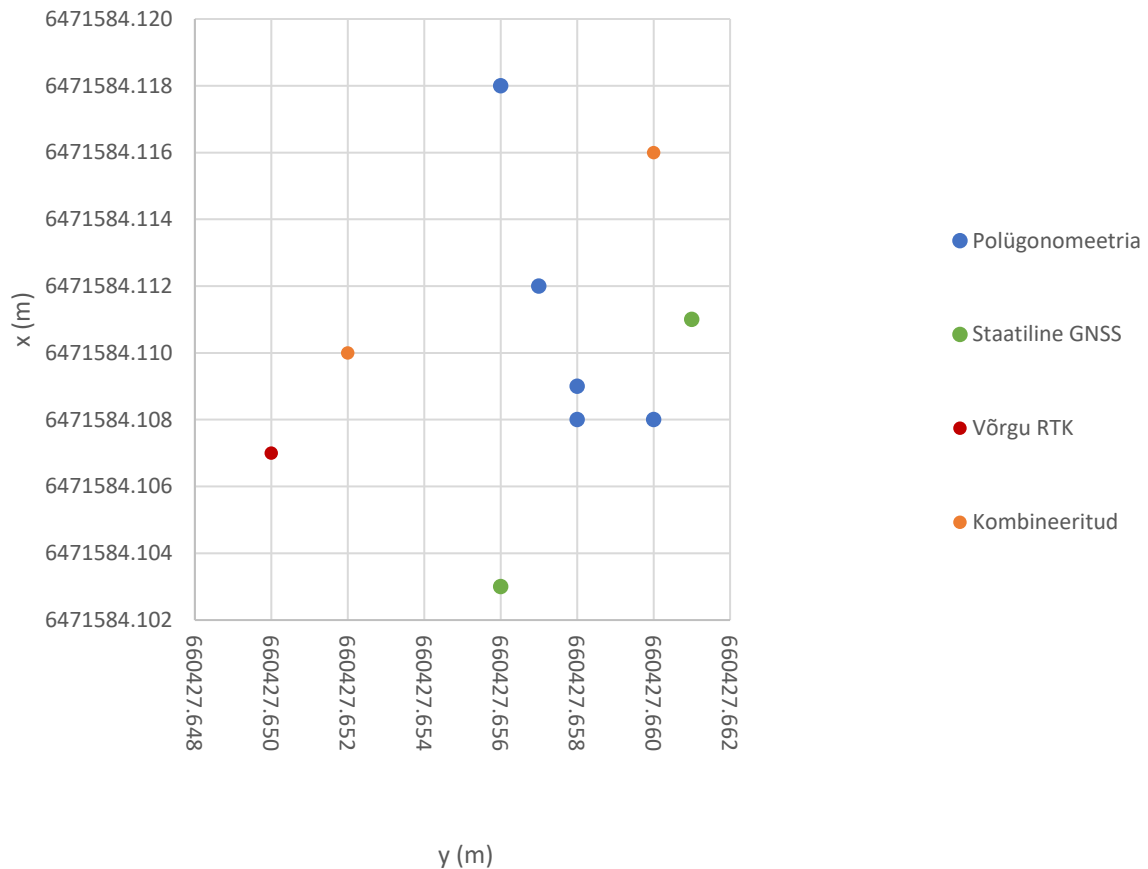
Punkti 20064 puhul tuleb samuti otsitava suuruse kõige tõenäolisema väärtuse leidmisel lähtuda veaellipsite suurustest ja suundadest. Punkti koordinaatide leidmiseks mõõdeti sõlmpunktidega polügonomeetriakäikude süsteem, kus oli kokku 12 jaama. Saadud andmete abil tehti

tasandusarvutus läbi erinevate võrgu konfiguratsioonidega (tulemused tabel 13, graafiliselt joonis 26).

**Tabel 13.** Geodeetilise märgile nr 20064 erinevatel meetoditel arvutatud koordinaadid ja nende standardhälbed (95% tõenäosusega)

Mõõtmismeetod	X (m)	Y (m)	$\sigma_X$ (m)	$\sigma_Y$ (m)
Polügonomeetriakäik I: lahtine käik mööda Turu tänavat	6471584,108	660427,660	0,0010	0,0022
Polügonomeetriakäik II: käik I + lähtepunkt 10065 ristuvalt suunalt*	6471584,108	660427,658	0,0008	0,0012
Polügonomeetriakäik III: lahtine käik mööda Ropka tänavat	6471584,118	660427,656	0,0012	0,0010
Polügonomeetriakäik IV: käik III + 10063 ja 10078 ristuvalt suunalt*	6471584,112	660427,657	0,0008	0,0010
Sõlmpunktiga polügonomeetriakäikude süsteem	6471584,109	660427,658	0,0008	0,0010
Staatiline GNSS mõõtmine I: mõõtmine ühe vastuvõtjaga punktil 20064, kasutatud Maa-ameti Tõraverre, Mehikoorma ja Jõgeva püsijaamu	6471584,103	660427,656	0,0053	0,0034
Staatiline GNSS mõõtmine II: vastuvõtja punktil 20064, tihendusvõrgu punktidel 749 ja 5031 (Trimble püsijaam)	6471584,111	660427,661	0,0037	0,0029
Võrgu RTK-mõõtmine	6471584,107	660427,650	0,0261	0,0186
Kombineeritud mõõtmine joonelis-nurgalise vastulõikega: lähtepunktid RTK ja elastne tasandus	6471584,114	660427,652	0,0090	0,0090
Mõõtmine joonelis-nurgalise vastulõikega: lähtepunktid andmekogust ja elastne tasandus	6471584,112	660427,662	0,0084	0,0084

\*plaanis oli kasutada kahte punkti ristuvatelt suundadelt, aga tasanduse käigus selgus, et osa lähtepunktide koordinaatidest on tõenäoliselt vigased ja seega ei saanud neid seotud tasanduses veatuks lugeda. Punkt 10078 tuli teiste võrgu konfiguratsioonide korral samuti kindelpunktide hulgas välja jätta, aga antud võrgu kuju puhul selle sobimatus ei ilmnunud.



**Joonis 26.** Punkti .20064 erinevatel meetoditel leitud koordinaatide paiknemine graafiliselt

Polügonomeetria mõõtmiste puhul eristub teistest ebasümmeetrilisema veaellipsiga ja suurema ida-lääne suunalise veaga lahtine käik mööda Turu tänavat. Punkti 10031 puhul nägime, et kui tasanduse lähtepunktide on otsitavale punktidel piisvalt lähedal ja nende täpsus hea, võib ka sirge käigu veaellips olla väga sümmeetriline. Piki Turu tänavat kulgeva käigu puhul olid probleemiks lähtepunktide täpsus – punkt 10078 tuli kindelpunktide hulgast välja arvata. Samuti olid käigu jooned ebaühtlasemate pikkustega. KGV punkt 10010 oli hävinud, aga kuna oli nähtavus sellest järgmise punktiga, mõõdeti otse sinna.

Käikude sisemise ja välise usaldusväärsuse näitajad erinevate võrgu konfiguratsioonide korral oluliselt ei muutunud. Kõiki käikusid iseloomustas suur väline ja pigem kesine sisemine usaldusväärsus.

Vaatame ka punkti 20064 korral lähemalt veaellipsite suurusi ja suundasid (Tabel 14)

**Tabel 14.** Veaellipsi suunad ja telgede pikkused punkti 20064 mõõtmisel

Mõõtmismeetod	Pikem pool- telg (m)	Lühem pooltelg (m)	Veaellipsi suund
Polügonomeetriakäik I	0,0022	0,0010	78°
Polügonomeetriakäik II	0,0012	0,0008	76°
Polügonomeetriakäik III	0,0012	0,0010	8°
Polügonomeetriakäik IV	0,0010	0,0008	70°
Sõlmpunktiga polügonomeetriakäikude süsteem	0,0010	0,0008	71°
Staatiline GNSS mõõtmine I	0,0067	0,0043	4°
Staatiline GNSS mõõtmine II	0,0047	0,0036	168°
Kombineeritud mõõtmine (RTK ja elastne tasandus)	0,0090	0,0090	146°
Mõõtmine lähtepunktid andmekogust ja elastne tasandus	0,0084	0,0084	146°

Veaellipsite suunad kahe punkti (20087 ja 20064) staatilistel mõõtmistel on identsed. Maa-ameti püsijaamade puhul oli see igati ootuspärane, sest jaamad on kaugel ja punktid Tartu linnas suhteliselt lähestikku, võrgu geomeetria on väga sarnane.

Polügonomeetriakäikude veaellipiste suunad on enamasti 70–80° vahel, vaid lahtine käik mööda Ropka tänavat on ses osas teistest oluliselt erinev. Ka elastse tasanduse veaellipsid on ootuspäraselt ümmargused.

Võrdlesin sõlmpunktiga polügonomeetriakäigu tulemusi ja 1) staatiline GNSS I, 2) staatiline GNSS II ja 3) kombineeritud mõõtmise (võrgu RTK-ga) tulemusi z-testide abil ja ühelgi juhul pole erinevus statistiliselt oluline.

#### 4.5.4. Võrgu RTK mõõtmine

Kuna võrgu RTK mõõtmisel ei ole vigade kovariatsioonimaatriks ja seega veaellips kättesaadavad, vaatame mõõtmisviisi eraldi veidi lähemalt. Punkti 10031 kontrolli puhul andis võrgu RTK mõõtmine tulemuse, mille kohaselt võiks kaaluda selle meetodi kasutamist KGV punktide asendi kontrolliks (vt tabel 7). Uute punktide 20087 ja 20064 puhul puuduvad teadaolevad koordinaadid, millega võrgu RTK mõõtmisi kõrvutada, kuid ülalpool tabelitest 10 ja 12 näeme, et mõõtmiste standardhälve ületab 2 cm ja juba seetõttu ei rahulda need KGV punktide mõõtmisele esitatavaid täpsusnõudeid.

Punktidel 10063, 10065, 10078 ja 10185 on samuti olemas nii võrgu RTK abil leitud kui GPA koordinaadid, kuna punkti 20064 puhul kasutati lõigete meetodil ajutiste punktide asemel olemasolevaid geodeetilisi märke, mille koordinaadid mõõdeti üle võrgu RTK-ga (vtabel 15). Need punktid said oma koordinaadid ühe mõõtesessiooni jooksul kokku üheksast mõõtmisest kolme erineva initsialiseerimisega. (Otse punktil RTK mõõtmiste puhul salvestati kahe üksteisest vähemalt kolmveerandtunnise vahega mõõtesessiooni jooksul kokku kümme mõõtmist, igaüks erineva initsialiseerimisega.)

**Tabel 15.** Geodeetilise märgi 20064 ümbruses asuvate märkide 10063, 10065, 10078 ja 10185 võrgu RTK meetodil leitud keskmised koordinaadid, nende standardhälbed (95% tõenäosusega) ja võrdlus geodeetiliste punktide andmekogu koordinaatidega

Punkti nr	X <sub>GPA</sub>	Y <sub>GPA</sub>	X <sub>RTK</sub>	Y <sub>RTK</sub>	$\sigma_X$	$\sigma_Y$	$\Delta X$	$\Delta Y$
10063	6471791,832	660370,093	6471791,848	660370,093	0,0166	0,0181	0,016	0
10065	6471581,878	660227,468	6471581,863	660227,462	0,0178	0,0116	-0,015	-0,006
10078	6471390,530	660411,078	6471390,540	660411,049	0,0088	0,0053	0,01	-0,029
10185	6471620,612	660578,428	6471620,585	660578,433	0,0049	0,0153	-0,027	0,005

Tabelist näeme, et juba võrgu RTK meetodil mõõdetud keskmiste koordinaatide ja andmekogu koordinaatide vahel on kahel juhul enam kui kahesentimeetrine vahe, satandardhälbe lisamisel mõõtmistulemustele ei mahu mitte ühegi punkti võrgu RTK meetodil mõõdetud keskmised koordinaadid KGV punktidele lubatud vea piiresse. Tuleb muidugi silmas pidada, et  $\pm 2$  cm on KGV punkti lubatud viga KGV 1. järgu punktide suhtes, RTK meetodil mõõtes aga toetub lahendus GNSS püsijaamadele, mis kuuluvad tihendusvõrku (HADNET) ja virtuaalsetele püsijaamadele, mille teenusepakkuja algoritmid meie mõõtmiste jaoks loovad. Viga KGV 1. järgu



punktide suhtes on sellel meetodil võimatu hinnata. Võrgu RTK meetodi kaitseks võib öelda, et punktid 10178 ja 10185 ei sobinud hästi ka polügonomeetria mõõdistuse andmetega – tasandustulemus tuli parem neid punkte kindelpunktide hulgast välja arvates.

## 5. TARTU KOHALIKU GEODEETILISE VÕRGU KASUTAMISEST

Tartu linnal on suhteliselt heas korras KGV ja suur osa polügonomeetriamärkidest on saanud endale täpsed kõrgused linna kõrgusvõrgu rekonstrueerimisel. Võrgutöid tehes kerkis mul küsimus, missugune saab olema meie teisaldatepunktide potentsiaalne kasutus? Mind huvitas, kui palju selle võrgu võimalusi üldse kasutatakse. Kas olukorras, kus GNSS võrgu RTK meetod on muutunud üha kättesaadavamaks, leiab KGV veel kasutust või on töövõtted juba põhjalikult muutunud? Otsisin sellele küsimusele vastust Tartu linna Geoarhiivist.

Triin Roosimäe leiab oma 2017. aastal Eesti Maaülikoolis kaitsnud magistritöös, mis käsitleb kohalike omavalitsuste geoarhiivide seisukorda, et kuigi seaduse kohaselt on omavalitsustel kohustus koguda ja arhiveerida geoandmeid, siis 10% nendest seda ei tee. Ülejäänud omavalitsuste geoandmete arhiivid on väga erineval tasemel.

Tartu piirkonna geomõõdistuste infosüsteem koondas Tartu linna, endise Ülenurme valla, Luunja, Nõo ja Tartu valdade andmeid. Tegemist oli igati korraliku ja kaasaegse digitaalse arhiiviga.<sup>2</sup>

Geoarhiivid üldjuhul, sh Tartu Geoarhiiv, pole mõeldud avalikuks kasutamiseks. Ligipääsuõiguse vormistab omavalitsuse geodeesiaspetsialist vastavalt vajadusele. Seni olen Geoarhiivi kasutanud OÜ WeW-is töötava maamõõtja rollis, aga Tartu linna Geodeesiateenistus võimaldas mulle uurimistöö läbi viimiseks vaateleja õigused. Tänu sellele oli mul ligipääs rohkematele andmetele ja sain analüüsida arhiivis registreeritud tööde aruandeid. Mind huvitas aruannete see osa, mis käsitleb KGV kasutamist. Selleks vaatasin läbi kõik Tartu linna geodeesiateenistuse poolt geoarhiiv registreeritud tööd 2020. aasta jaanuari, mai- ja juunikuust. Kokku oli registreeritud töid 463, aga sinna hulka on arvatud ka linna Geodeesiateenistuse

---

<sup>2</sup> Magistritöö esitamise ajal on Tartu Geoarhiiv värskest uuendatud ja vallad pole oma lahendustega veel välja tulnud. Digitaalse arhiivi ülesehitus on sarane ja kasutusmugavus võrreldav varasema tarkvaralise lahendusega.

algatatud andmekorrasustööd ja haldusreformijärgselt linnaga liidetud Tähtvere valla tööd, mida nüüd järk-järgult arhiivi kantakse. Neid töid kõrvale jättes oli uusi töid kokku 425. Kuna arhiivis ei koguta eraldi statistikat mõõdistuse lähtepunktide kohta, koostas in is andmetabeli, kuhu kandsin iga aruande kohta järgmised andmed:

- töö liik (teostusjoonis, topo-geodeetiline uuring, ehitusjärgne topo-geodeetiline uuring, kontrollmõõdistus);
- töö number ja töö teostanud firma (vältimaks segadusi andmetes, ei ole mõeldud avaldamiseks);
- mõõtmise liik (tahhümeetiline, GNSS võrgu RTK, integreeritud-kombineeritud);
- kasutatud lähtepunktid (GNSS võrgu RTK, KGV, KGV ja GNSS võrgu RTK, varem rajatud mõõdistusvõrk juhul kui selle rajamisviisi kohta puudus täpsustus – tavaliselt oli see aruannetes täpsustatud ja siis märkisin tabelisse mõõdistusvõrgu rajamisel kasutatud lähtepunktide andmed);
- kasutatud KGV (või ühel juhul RGV) numbrid;
- võrgu RTK teenusepakkuja;
- märkus GNSS seadme kontrollimise kohta ja punkti number, kui see oli ära toodud.

Enne aruannete läbi vaatamist polnud mul täit veendumust, et ma vastavad andmed igast aruandest leian. Kuigi Majandus- ja kommunikatsiooniministri määrus Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistamisele esitatavad nõuded (2016 § 9) sätestab üsna detailselt, missugused andmed peavad kajastuma uuringu aruandes, on aruanded üsna eriilmelised ja need ei sisalda alati kõiki nõutud komponente. Nt mõõdistusvõrgu skeem, võrgu arvutus ja tulemus, mis määrukses nõutud, on aruannetele lisatud pigem harva.

Tööde liigi (geoalus, ehitusjärgne mõõdistus, teostusmõõdistus) kohta kogub andmeid ka Geoarhiiv ja vastav statistika avaldatakse igaastaselt. Kõige rohkem registreeritakse arviivis teostusmõõdistusi – 2020. aastal kokku oli neid 993 ja vaatlusalusel kolmel kuul 222. See on mõistetav, sest ühel ehitusobjektil tehakse erinevaid teostusmõõdistusi ja mõnikord üsna pika aja jooksul (torustike, kaablite jne omad). Geoaluseid registreeriti 2020. aastal kokku 709 ja vaadeldaval perioodil 150. Ehitusjärgseid mõõdistusi registreeriti 2020. aastal 220 ja kolme kuu jooksul 53.

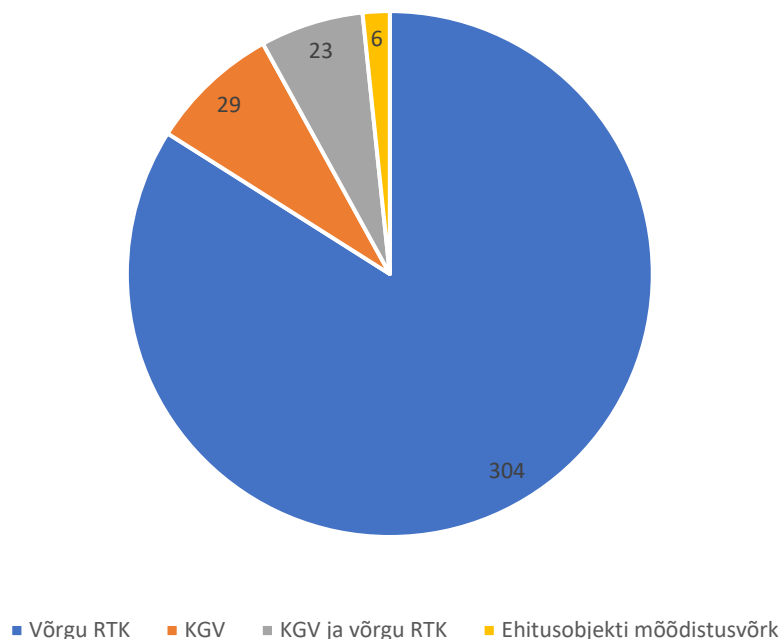
Sõnastasin esialgse uurimisküsimuse: kas teatud sorti töödel (suurte ehitusobjektide mõõdistusvõrgu rajamine, teostusmõõdistused) eelistatakse siiski kohtkindlalt paigaldatud ja kontrollitavat KGV-d?

Andmeid läbi käies sai juba kvalitatiivse analüüsiga selgeks, et KGV punktide kasutamine on seotud pigem teatud geodeetide tööga kui objekti liigi või isegi mõõtala kaugusega KGV punktist, seetõttu ei hakanud ma kvantitatiivseid teste tegema. Minu valitud perioodi ei sattunud paraku suuremaid infrastruktuuriobjekte ega hoonete ehitusi, see võib tulemust omajagu mõjutada.

Kolmandikul juhtudest, kui mõõdistuse sidumiseks oli kasutatud KGV punkte, oli töö tegijaks olnud üks konkreetne geodeet, kes aga aruannete põhjal otsustades kasutab vajadusel ka mõõdistuse sidumist võrgu RTK abil. Selline vajadus võib haldusreformijärgse Tartu piires lihtsasti tekkida. Ilma haldusreformitagi on Eesti suurematele keskustele iseloomulik valglinnastumine ja sel moel KGV-st “välja kasvamine”.

Geodeetide eelistatuimaks töövahendiks on geoarhiivi andmete põhjal tahhümeeter. Ligi 60% töödest on tahhümeetrilised mõõdistused, 8% ainult võrgu RTK meetodil tehtud ja ülejäänud juhtudel on kombineeritud tahhümeetrilist ja võrgu RTK mõõtmist. Tahhümeetri orienteerimiseks kasutatakse valdavalt GNSS võrgu RTK seadme abil mõõdetud ajutisi kindelpunkte (joonis 27). Ühel juhul oli võrgu RTK mõõtmise puhul välja toodud, et GNSS seadet kontrolliti enne mõõtma asumist KGV punktil ja ära toodud ka punkti number.

### Tahhümeetrilise mõõdistuse sidumiseks kasutatud punktid



**Joonis 27.** Tahhümeetrilise mõõdistuse sidumiseks kasutatud punktid Tartu Geoarhiivis registreeritud tööde aruannete kohaselt

Kõikidest vaatlusalustest tööde aruannetest leidsin viiteid kõrgusvõrgu kasutamisele vaid neljal juhul ja kahel neist oli ka plaaniste koordinaatide määramiseks kasutatud vähemalt ühte KGV punkti. Ühel juhul oli tahhümeeter orienteeritud võrgu RTK abil mõõdetud ajutistelt kindelpunktidelt ja kõrguslik sidumine oli tehtud lähedalasuvale seinareeperile. Ühel juhul oli RTK abil rajatud mõõdistusvõrk, mille kõrgused saadi geomeetrilise nivelleerimisega. Nivelleerimiskäik oli rajatud kahe kõrgusvõrgu punkti vahele. Samas torkas silma ka paar tööd, mille tööala sisse jäi seinareeper, mida aga kõrguse määramiseks kasutatud ei olnud. Kuna minu magistr töö fookus on KGV plaanilistel punktidel, siis selle kohta ma eraldi andmeanalüüsi ei teinud, kasutamata seinareepereid panin tähele tänu sellele, et mõne reeperi asukoht on mulle Tartu linnas tööde tegemise käigus lihtsalt meelde jäänud.

Arvestades, et Tartu linnas on kõrgusvõrk üsna hiljuti rekonstrueeritud ja selle töö käigus on täpsed looditud kõrgused saanud ka väga suur osa KGV punkte, väärib kõrguste teema kindlasti enam tähelepanu, edaspidist uurimist ja võibolla ka geodeetide hulgas propageerimist. Nagu

erinevad viimastel aastatel EMÜ-s kaitstud tudengitööd (Uusmaa 2019, Kõre 2018, Rosenberg 2018, Svežova 2018, Kirs 2017) on demonstreerinud (ja käesoleva töö kontrollmõõtmine RGV punktil Lemmatsi<sup>97</sup> kinnitas), on võrgu RTK meetodi plaaniline täpsus väga hea, aga kõrguslik jätab kohati soovida. Kuigi võrgu RTK meetod tagab enamikel juhtudel nõuetekohase kõrgusliku täpsuse ühe töö piires (vt Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavad nõuded 2016), siis kõikide Geoarhiivi või muudesse andmekogudesse (nt Ehitisregistri juurde kuuluv E-ehituse platvorm ja selle visualiseerimisrakendus 3D kaksik) kogutavate andmete ühildumist nõuetekohase täpsusega see aga tagada ei pruugi. Samuti on Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavates nõuetes (§ 7) kirjas, et kõrguslik möödistamisvõrk tuleb üldjuhul siduda kõrgusvõrku kaasatud lähtereeperiga.

Geodeetiliste võrkude kasutamine topo-geodeetilistel uuringutel ja teostusmöödistustel on teema, mis vääraks põhjalikumalt eraldiseisvat uurimist. Edaspidi oleks otstarbekas vaadelda KGV ja kohaliku kõrgusvõrgu ning riiklike kõrgusvõrkude kasutamist koos, kaasata uuringusse erinevaid asulaid ja täpsustada valimi moodustamise metoodikat.

## 6. ARUTELU

Tartu KGV on suhteliselt heas seisus, aga loomulikult leidub siingi praeguseks juba hävinud ja rikutud märke. Võrreldes 2005. aastal rajatud ja mõõdetud KGV 1. järgu skeemi (joonis 28) praegu Geodeetiliste punktide andmekogus olevate andmetega, on 1. järgu märke alles 9 võrra vähem (mis moodustab 25% võrgust). Andmekogust 1. järgu punktide hulgast ei leia punkte nr 27, 274 (andmekogus 2. järgu punktina), 343, 5929 (teisaldatud, saanud uueks numbriks 69291 ja klassiks erineva meetodika ja täpsusega teostatud GPS-mõõtmised), 9385, 10004, 10012, 10014, 10016. Ülejäänute hulgas on kuus sellist, mille puhul GPAsse kantud märkus *korras* aastal 2005 ja hilisemad märged puuduvad. Võib arvata, et 603 KGV 2. järgu punktiga on olukord umbes võrreldav. Magistritöös vaatluse all olnud märkidest olid hävinud peamiselt küll ainult ajutised märgid, asfaldinaelad. Igal aastal vajab rida 2. järgu märke ka teisaldamist või kontrollmõõtmist.

Tartu KGV rekonstrueerimine lõppes aastal 2006. Varasemalt kasutuses olev võrk oli suuremas osas rajatud ja mõõdetud 1981. – 1982. aastal tehtud geodeetiliste tööde käigus. Toona leiti, et põhivõrkude järjekordse rekonstrueerimise peakski ette võtma umbes kahekümneaastase ajavahemiku järel (Laos, Müller 2006: 13). Seda arvesse võttes on Tartu KGV funktsionaalsest kasutusajast kolmveerand möödunud ja varsti tuleks hakata planeerima järjekordset rekonstrueerimist. Kuna vajadus tihedalt paiknevate KGV punktide järele on märkimisväärselt vähenenud, mõõtmiste usaldusväärse sidumise kehtiva geodeetilise süsteemiga saab teha lihtsalt ja kiirelt võrgu RTK meetodil, ei pruugi võrgu järjekordne täielik rekonstrueerimine aga otstarbekas olla. Pilguheit Tartu Geoarhiivis registreeritud geodeetiliste tööde aruannetele näitas, et Tartus kasutatakse tahhümeetri orienteerimiseks enamasti võrgu RTK meetodil mõõdetud ajutisi kindelpunkte.

Kohalik kõrgusvõrk rekonstrueeriti Tartus aastail 2017 ja 2018. Üsna suur osa KGV punktidest hõlmati ka kõrgusvõrku, ülejäänutele arvutati uued kõrgused 2006. a mõõdetud joonepikkuste

ja seniitkauguste abil trigonomeetrilise nivelleerimise tasanduses (Tartu kõrgusvõrgu rekonstrueerimine 2018). Kõrgusvõrku hõlmatud KGV punktide õiguslik seisund jääb mulle



**Joonis 28.** Tartu KGV 1. järgu skeem (Lainevool ja Ostonen 2005)

ebaselgeks: tööde aruandest loen välja, et tegemist on kõrgusvõrku kuuluvate punktidega, kuid kas tegemist on Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavate nõuete (2016) kohase kõrgusvõrgu lähtepunktiga? GPA-s puudub märge samaaegselt kõrgusvõrku kuulumise kohta, küll aga võib andmeid lähemalt vaadates näha, et kõrguse klass on nivelleerimine, II klass. Kindlasti soodustaks värskest rekonstrueeritud kõrgusvõrgu kasutamist



see, kui info nende punktide kohta oleks GPA graafilises vaates kergesti kättesaadav. Üldiselt on geodeetide hulgas levinud arusaam, et polügonomeetriavõrgu punkte mõõdistuse kõrgusliku lähtepunktina kasutada ei saa ja vähemalt noorema põlve geodeetidel ei pruugi isegi olla teadmisi selle kohta, et KGV 2. järgu punktil peaks eraldi vaatama, kuidas on talle leitud kõrgus. Nagu Tartu Geoarhiivis registreeritud tööde aruannete analüüs näitas, kasutati kõrgusvõrku vaatlusalusel perioodil häbiväärselt vähe.

## 6.1. Hinnang võrreldud meetoditele

Töö praktilises osas leiti, et KGV 2. järgu punktide jaoks kõige täpsem ja samas aeganõudvam meetod on **polügonomeetria mõõtmine**. See tagab ka parima kokkusobivuse olemasoleva võrguga. Olukorras, kus võrgu amortiseerumisel pole võibolla ette näha võrgu järjekordset rekonstrueerimist (nagu seda siiani paari-kolmekümne aasta tagant tehtud on), on siiski mõistlik kaaluda vajadust kasutada laiemalt GNSS mõõtemetodeid. Juba praeguseks on mitmed KGV 1. järgu punktid hävinud. Töö autoril puudub sellest, kui paljud 2. järgu punktid on praeguseks teisaldatud, aga selge on see, et aasta-aastalt muutub raskemaks ühest tasandusest pärit lähtepunktide kasutamine uute märkide teisaldamisprojektides või märkide kontrollimisel. Kui kindelpunktid jäävad uuritavast punktist väga kaugemale, väheneb mõõtmiste täpsushinnang. Tõenäoliselt mitte küll sellisel määral, et saadud tulemus ületaks KGV 2. järgu punktidele seatud nõudeid – käesolevas töös oli polügonomeetria puhul tulemuse suurimaks standardhälbeks  $\pm 2,2$  mm. Samuti muutub võrgu füüsilise deformatsiooni korral keeruliseks tasandusarvutusi teha seni ootuspäraste *a priori* veahinnangutega. Kontrollmõõtmised võivad küll näidata KGV punkti mahtumist lubatud vea piiresse peale märgi kaitsevööndis tehtud töid, aga varasemat sobivust naaberpunktidega ei pruugi enam olla.

Jätkuvalt võib välistada **võrgu RTK** meetodi (samale järeldusele jõudis Dun 2013). Kuigi kiire ja odav, ei taga võrgu RTK KGV 2. järgu mõõtmisteks vajalikku täpsust. Kontroll võrgu sidususe säilimiseks puudub sel meetodil täielikult ja eeskujuks olnud Soomes, kus see meetod on lubatud, on selle kasutamise tingimuseks nähtavusulatuses olevate naaberpunktide puudumine. Sellistele tingimustele vastavate märkide rajamine või säilitamine Eestis tundub ebaotstarbekas. Juhul kui mõni selline punkt peaks eksisteerima ja vajama kontrollimist, võib

kaaluda kontrollmõõtmiseks võrgu RTK meetodi lubamist soovitatavalt Maa-ameti võrgus (vastavalt Svežova 2018 tulemustele).

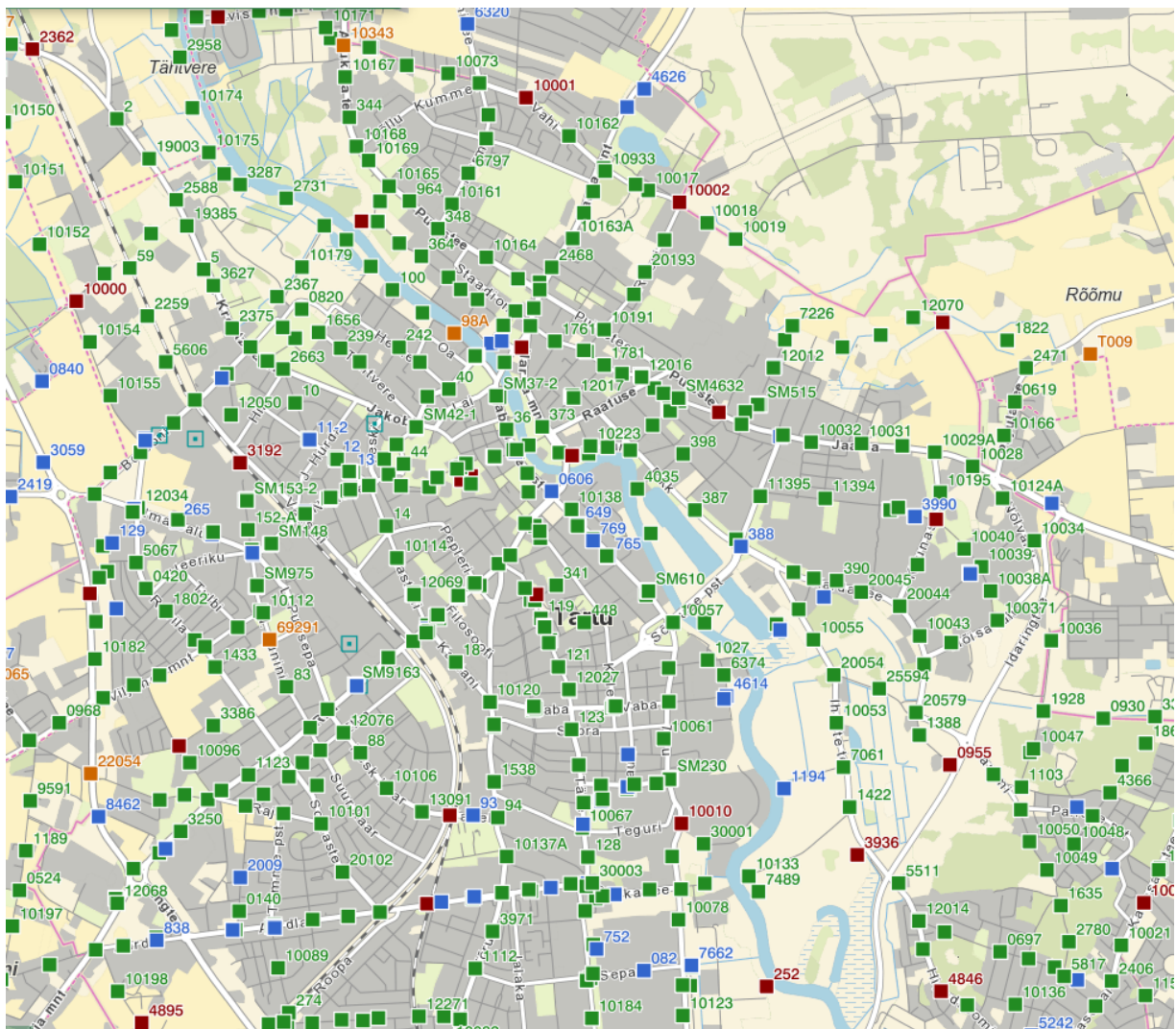
Magistritöös katsetati ka **joonelis-nurgalise vastulõike meetodil** koordinaatide leidmist ajutistelt kindelpunktidele, mis olid mõõdetud võrgu RTK meetodil. Meetod oli kiire ja tulemused polnud võrreldes polügonomeetria mõõtmise tulemustega statistiliselt oluliselt erinevad. Mõõtmiste standardhälbed olid oluliselt suuremad kui polügonomeetria puhul, kuid mahtusid kenasti KGV 2. järgu nõuete piiresse. Siiski ei taga selline meetod võrgu sidususe säilimist ja suureks probleemiks on linnakeskkonnas lähtepunktide jaoks sobivate asukohtade leidmine. Tänavatevõrk, hooned ja haljastus seavad selles osas rea piiranguid nii horisondi avatust kui nähtavuse olemasolu ajutiste kindelpunktide ja uuritava punkti vahel silmas pidades. Selle meetodi kasutuselevõtt ei oleks kokkuvõttes otstarbekas.

**Staatilisel mõõtmisel** püüdsin täpselt järgida erinevatest seadustest ja juhenditest pärit nõudeid ja projekteerisin n-ö lausvõrgu. Ainult ühest kolmnurgast koosnev võrgu asemel, nagu see kahte tihendusvõrgu punkti kasutades tehti, oleks otstarbekam olnud mõõta hoopis vähemalt kolm vektorit (kulunud aeg olnuks sama). Praktikas kasutatakse vektorarvutust ja mitte lausvõrgu tasandust geodeetiliste tööde aruannete põhjal küll, vähemalt punktide asendi kontrollimiseks (nt Härm 2020, Must 2019), aga nõudeid selleks pole mitte üheski juhendis selgelt sätestatud.

RGV II klassi või tihendusvõrku kuuluvate **püsijaamade kasutamine KGV punktide staatilisel mõõtmisel** on täielikult reguleerimata ja seda pole ma ka üheski geodeetiliste tööde aruandes kohanud. Sarnaselt Soomega võiks see Eestis lubatud meetod olla, kuigi võrreldes käesolevas magistritöös tehtud väikse eksperimendiga peaks mõõtesessioonid nii pikkade baasjoonte puhul olema pikemad. Kuluv aeg pole probleem, kui mõõteinstrumendi juures viibimist ei peeta turvakaalutlustel vältimatult vajalikuks.

Püsijaamade kasutamise eelis võrreldes olukorraga, kus lähtepunktid valitakse passiivsetest võrkudest, seisneb selles, et aktiivsed võrgud on käesoleval ajal paremini hooldatud ja nende andmed on kaasaegsemad. Tihendusvõrk ja kohalikud võrgud samal ajal tasapisi vananevad. Maamõõdupraktikad on muutunud ja enamasti seovad geodeedid oma mõõdistuse võrgu RTK meetodi abil aktiivsete püsijaamadega nagunii.

Vahet ei ole, missuguseid lähtepunkte ja kui pikki vektoreid staatilise GNSS mõõtmise puhul kasutatakse, kindlasti peaks mõõtma võrgus kontrollpunkte ja vektori uuritava punkti ja tema läheduses olevate punktide vahel – vaid niimoodi saab tagada võrgu sisemise sidususe säilimise. See tuleks tulevikus vastavates juhendites selgelt reguleerida, nagu ka nõuded vektorarvutusele. Kui kasutatakse lähtepunkte passiivsetest võrkudest ja selle käigus selgub, et mõni lähtepunkt on tõenäoliselt vigane, peaks edasine asjade protseduuriline käik samuti selgelt reguleeritud olema.



**Joonis 29.** Tartu linna kohaliku võrgu punktid GPA kaardirakenduses. Punane ruut - KGV 1. järk; roheline ruut – KGV 2. järk, sinine ruut – KGV 3. järk. Üksikult staatilise GNSS mõõtmise abil rajatud punktid on GPA kaardil märgitud oranžiga ja Tartu linna administratiivpiiride sisse jääb neid 4. Aluskaart Maa-amet

Optimaalseim meetodi on staatiline GNSS mõõtmine olukorras, kus uuritava punkti naaber-punktid on hävinud või nähtavus punktide vahel kadunud. Samas peab arvestama, et staatilise GNSS meetodi kasutamist piiravad keskkonnatingimused – horisont peab olema piisavalt avatud ja vältida tuleks signaalide võimalikku peegeldumist.

Geodeetiliste tööde kord lubab KGV 2. järgu punkte staatilisel GNSS meetodil mõõta. Seni on Tartu KGV-s staatilise GNSS mõõtmise meetodil rajatud punktid võimalik üles lugeda ühe käe sõrmedel (joonis 29) ja kõik nad on saanud klassiks *erineva metoodika ja täpsusega teostatud GPS mõõtmised*. Ükski minu vaadeldud juhend ega määrus aga sellist KGV võrgu klassi ei sätesta.

## KOKKUVÕTE

Magistritöö käsitles kohalike geodeetiliste võrkude temaatikat Tartu linna ja siinse põhivõrgu näitel. Töö käigus uuriti, missugune on kõige efektiivsem viis üksikute KGV 2. järgu punktidele koordinaatide määramiseks selliselt, et need vastaksid ettenähtud täpsusnõuetele. Analüüsiti seaduseid, määruseid ja juhendeid, mis geodeetiliste tööde tegemist reguleerivad ja vaadeldi, kas nende kohaselt võiks KGV 2. järgu punktide mõõtmiseks kasutada alternatiivseid meetodeid lisaks polügonomeetria mõõtmisele. Seaduseid ja määruseid võrreldi ka lähinaabrite omadega.

Kuigi Geodeetiliste tööde korras on sätestatud, et KGV 2. järgu punktide mõõtmisel võib kasutada kas polügonomeetria mõõtmist või staatilist GNSS tehnoloogiat, jäävad täpsemad nõuded ebaselgeks. Praktikas on staatilise GNSS tehnoloogia kasutamine üliharv ja Tartu linna näitel ei jõua selle tulemusena andmekogusse geodeetiline punkt, millele oleks määratud klassiks KGV 2. järk vaid hoopis määruses Geodeetiline süsteem mitte esinev klass *erineva meetoodika ja täpsusega teostatud GPS mõõtmised*, mida pole mainitud ka Maa-ameti KGV rajamise ja rekonstrueerimise juhendis.

Töös selgitati ka välja, et kohaliku geoarhiivi andmete abil on võimalik saada ülevaade sellest, kui palju KGV-d üldse kasutatakse ja tehti sel teemal pilootuuring. Uuringu tulemusel selgus, et traditsiooniliste maamõõtetehnoloogiate kasutamine on pea täielikult taandunud ja enamasti kasutatakse tahhümeetri orienteerimiseks mitte KGV märke vaid võrgu RTK meetodil mõõdetud ajutisi kindelpunkte. Seda tehes ignoreerivad geodeedid senist võrkude hierarhiat, sest võrgu RTK kommertsteenuse pakkujate püsijaamad on arvatud KGV tihendusvõrku ja mõõtmistele luuakse virtuaalsed tugijaamad neile püsijaamadele toetudes. KGV punktide teisaldamisel ja kontrollimisel lähtutakse võrkude hierarhia põhimõttest.

Meie lähinaabritest Soomes on loobunud KGV mõõtmistel võrkude traditsioonilise hierarhia järgmise nõudmisest ja kohalike võrkude kõikide klasside punktidele võib mõõta koordinaate staatilisel GNSS meetodil. Kuidas seda teha on väga punktuaalselt reguleeritud. Rootsis on

kohalikest passiivsetest plaanilistest võrkudest sootuks loobutud, ainuke viis mõõdistuse sidumiseks riikliku geodeetilise süsteemiga on kasutada püsijaamade andmeid – kas riiklikke või kommertsteenuse pakkujate omi. Kõrguslikult tuleb mõõtmised aga igal juhul siduda passiivsete kõrgusvõrkudega, püsijaamade andmed ja geoidi mudel piisavat täpsust ei taga. Lätis pole siia maani võrkude rekonstrueerimisega nii kaugele jõutud kui Eestis, sihiks on võetud suuremate asulate võrgud korda teha, aga seni ollakse kohati sunnitud püsijaamu kasutama.

Kohalikus geoarhiivis registreeritud tööde arundeid analüüsides on võimalik saada pilt KGV-de kasutamises ja see teema väärriks edaspidi käsitlemist täiesti eraldi uurimuses. Kaasatud võiks olla rohkem kohalikke omavalitsusi, vaatluse alla võiks võtta pikema perioodi, moodustades valimi selliselt, et saada võimalikult representatiivne ülevaade. Edaspidi pole ka mõtet piirduda plaaniliste võrkudega. Põgus analüüs näitas ka, et paljud aruanded ei sisalda kogu seaduses ettenähtud infot. Laialdasem uuring võimaldaks analüüsida, kas parandamist vajab seadusandlus või tööde tegijate seaduskuulekus.

Senisest enam tuleks pöörata tähelepanu kohalike kõrgusvõrkude kasutamisele. Selle olulisust peaks rõhutama tulevaste geodeetide väljaõppel. Integreeritud võrkude puhul (KGV ja kõrgusvõrk koos) võiks info selle kohta olla kättesaadav GPA kaardivaates.

Muutunud töövõtete valguses ei ole tõenäoline, et viie või kümne aasta pärast hakataks Eestis taasiseseisvumise järel rekonstrueeritud geodeetilisi võrke sarnases mahus uuesti rekonstrueerima – kohtkindlalt paigutatud KGV punktide järele lihtsalt ei ole enam endisel tasemel nõudlust. Võttes arvesse ka naabrite kogemusi oleks paras aeg teha strateegilisi otsuseid KGV-de edasise saatuse osas.

Töö autori arvates võiks senisest enam kasutada ja senisest paremini reguleerida staatilise GNSS tehnoloogia kasutamist KGV 2. järgu punktide mõõtmisel, nõnda et tagatud oleks võrgu sidusus. Püsijaamade kasutamine võiks aidata KGV-de vananemist pidurdada. Endiselt olulisimaks meetodiks KGV 2. järgu punktide teisaldamisel ja kontrollil jääb ilmselt polügonomeetria. Töös vaadeldi ka, kas vajalikku täpsust oleks võimalik saavutada võrgu RTK meetodil või kombineeritud meetodil, kus tahhümeetriga tehakse joonelis-nurgaline vastulõige võrgu RTK meetodil leitud ajutistele punktidele. Kumbki meetod pole KGV tööde jaoks sobiv.

## KASUTATUD KIRJANDUS JA ALLIKAD

- Alfredsson, A., Alm, L., Dahlström, F., Jivall, L., Kempe, C., Wiklund, P.** (2019). Förvaltning av de nationella geodetiska referensnäten. – *Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem*. Lantmäterirapport. Gävle: Lantmäteriet. 26 lk.
- Baarda, W.** (1967). Statistical concepts in geodesy (Vol. 2). – *Rijkscommissie voor Geodesie*. 75 lk.
- Baarda, W.** (1968). A testing procedure for use in geodetic networks. *Publications on Geodesy, Netherlands Geodetic Commission*. 97 lk.
- Baarda, W.** (1973). S-transformation and criterion matrices. – *Publications on Geodesy, Netherlands Geodetic Commission*.
- Beutler, G.** (2004) Revolution in Geodesy and Surveying. – *PSI Plenary Session I –Geodesy and Space Technology. FIG Working Week 2004 Conference Proceedings*. 20 lk.  
[https://195.69.128.12/resources/proceedings/fig\\_proceedings/athens/papers/ps01/ps01\\_1\\_beutler.pdf](https://195.69.128.12/resources/proceedings/fig_proceedings/athens/papers/ps01/ps01_1_beutler.pdf)
- Celms, A., Parsova, V., Reke, I., & Akmentins, J.** (2018). Tendencies of development of local geodetic network in Riga city. – *Baltic surveying. International scientific journal* (Latvia, Lithuania, Poland). Lk 8–15.
- Celms, A., Reke, I., Brinkmanis-Brimanis, M., & Pukite, V.** (2019). Evaluation of the local geodetic network in Jurmala City. – *Baltic surveying. International scientific journal* (Latvia, Lithuania, Poland).
- Dun, Y.** (2013). Tartu kohaliku geodeetilise võrgu ajalooline ülevaade. Magistritöö Eesti Maaülikooli Geomaatika osakonnas.
- Ekman, M.** (1998). Jordellipsoider, geoider, koordinatsyste, höjdsystem och tyngdkraftssystem I Sverige genom tiderna. – *Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem*. Lantmäteriet. Gävle 1998. 74 lk. [https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-geodetisk-matning/rapporter/lmv\\_rapport\\_1998-4\\_ekman.pdf](https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-geodetisk-matning/rapporter/lmv_rapport_1998-4_ekman.pdf)
- Engberg, L. E., Lilje, M., Ågren, J.** (2010). Is There a Need of Marked Points in Modern Geodetic Infrastructure? – *The XXIV FIG International Congress Proceedings*. 7 lk.
- Euref** (2021). European Geodetic Reference Systems. [veebileht] [http://www.euref.eu/euref\\_egrs.html](http://www.euref.eu/euref_egrs.html) (15.04.2021).

- Fladrova, H., Štroner, M.** (2019). Accuracy measurement determination on different distances using geodetic network measurement and adjustment. – *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 19(2.2). Lk 25-30.
- Geodeetiliste tööde tegemise ja geodeetilise märgi tähistamise kord, geodeetilise märgi kaitsevööndi ulatus ning kaitsevööndis tegutsemiseks loa taotlemise kord. Keskkonnaministri määrus. (Vastu võetud 28.06.2013, viimati täiendatud 26.12.2017). – *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/103072013014> (16.04.2021)
- Geodeetiliste punktide andmekogu (i a). Interneti-andmebaas. <https://gpa.maaamet.ee/> 20.04.2021
- Geoportaal (2021). Eesti geodeetiline süsteem. [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geodeetilised-andmed/Eesti-geodeetiline-susteem-p223.html> (23.04.2021).
- Geoportaal (2019). Geodeetilised võrgud. [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Geodeetilised-andmed/Geodeetilised-vorgud-p281.html> (23.04.2021).
- Ģeotelpiskās informācijas likums. (vastu võetud 17.12.2009, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.07.2018). – *Latvijas Vēstnesis*. <https://likumi.lv/ta/id/202999-geotelpiskas-informacijas-likums> (20.04.2021).
- Grafarend, E. W.** (1974). Optimization of geodetic networks. – *The Canadian Surveyor*, 28(5). Lk 716-723.
- Grafarend, E. W., & Sansò, F.** (Eds.). (1985). Optimization and design of geodetic networks. Springer Verlag. 605 lk.
- Hekimoglu, S; Erenoglu, R. C.; Sanli, D. U.; Erdogan, B.** (2011). Detecting Configuration Weaknesses in Geodetic Networks. – *Survey Review*, 43 (323). Lk 713–730.
- Helmert, F.R.** (1868). Studien über rationelle Vermessungen im Gebiete der höheren Geodäsie. 72 lk. <http://digital.slub-dresden.de/id3333596722>
- Helsinki kaupunki (i.a). Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät. [https://www.hel.fi/helsinki/fi/kartat-ja-liikenne/kartat-ja-paikkatieto/paikkatiedot+ja+-aineistot/koordinaatistot\\_ja+\\_korkeudet/koordinaatti\\_ja\\_korkeusjarjestelmat](https://www.hel.fi/helsinki/fi/kartat-ja-liikenne/kartat-ja-paikkatieto/paikkatiedot+ja+-aineistot/koordinaatistot_ja+_korkeudet/koordinaatti_ja_korkeusjarjestelmat) (23.04.2021).
- Hirvonen, R. A.** (1961). The reformation of geodesy. – *Journal of Geophysical Research*, 66(5). Lk 1471-1478.
- Hirvonen, R. A.** (1971). Adjustment by least squares in geodesy and photogrammetry. New York. 261 lk.
- JHS 184. Kiintopistemittaus EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä (2017). <http://www.jhs-suositukset.fi/suomi/jhs184>
- Häkli, P.** (2004). Practical Test on Accuracy and Usability of Virtual Reference Station Method in Finland. – *FIG Working Week 2004 Proceedings. Technical Paper*. 16 lk.



- Häkli, P.** (2014). JHS-suositus 184: Kiintopistemittaus EUREF-FIN-koordinaatijärjestelmässä. – *Geodesian teemapäivä 10.9.2014 Tieteiden talolla* <http://www.kolumbus.fi/eino.uikkannen/Geodesiapaiva/index.htm> 10.04.2021
- Härm, M.** (2020). Kohaliku geodeetilise võrgu punkti nr 4895 asendi kontroll. Geodeetiliste tööde aruanne. Tartu. 21 lk.
- Kala, V.** (2009). Geodeetiliste mõõtmiste andmetötluse teooria alused. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus. 186 lk.
- Kala, V., Ellmann, A., Märdla, S.** (2015). Kõrgem geodeesia : polügonomeetria ja kõrgtäpne nivelleerimine. TTÜ Kirjastus. 223 lk.
- Kirs, E.** (2017). Eesti RTK GNSS võrkude täpsuse hindamine. Bakalareusetöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Klein, I., Matsuoka, M. T., Guzzato, M. P., Nievinski, F. G., Veronez, M. R., & Rofatto, V. F.** (2019). A new relationship between the quality criteria for geodetic networks. – *Journal of geodesy*, 93(4). Lk 529–544.
- Knight, N. L., Wang, J., & Rizos, C.** (2010). Generalised measures of reliability for multiple outliers. – *Journal of geodesy*, 84(10). Lk 625–635.
- Koch, K. R.** (1982). Optimization of the configuration of geodetic networks. – *Deutsche Geodaetische Kommission*. Munich, B, 258/III. Lk 82–89.
- Kohaliku geodeetilise võrgu rajamise ja rekonstrueerimise juhend (2018). <https://geoportaal.maaamet.ee/docs/Geodeesia/Kohaliku-geodeetilise-vorgu-rajamise-ja-rekonstrueerimise-juhend.pdf?t=20180511112316> 20.05.2021
- Kollo, K., Valder, V.** (2012). Struve kaar. *Geodeet* 42 (66). Lk 42–44.
- Kuuler, H.** (2018). Torma alevi kohaliku geodeetilise põhivõrgu rekonstrueerimine. Bakalareusetöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Kõiva, K.** (2003). Elektro-optilise kaugusmõõtja kalibreerimistulemuste ja mõõtmisandmete redutseerimise vajalikkus kohalike geodeetiliste põhivõrkude tasandamiseks. Bakalareusetöö TTÜ rakendusgeodeesia erialal.
- Kõre, K.** (2018). RTK GNSS mõõtmiste stabiilsus ja täpsus erinevates püsijaamade võrkudes. Bakalareusetöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Lainevool, R., Ostonen, A.** (2005). Tartu linna plaanilise geodeetilise põhivõrgu 1.järgu rekonstrueerimine ja rajamine. Tehniline aruanne. Tallinn
- Lainevool, R., Rüdja, A.** (2018). Tartu kõrgusvõrgu rekonstrueerimine. Geodeetiliste tööde aruanne. Laagri. 112 lk.

- Laos, K., Müller, L.** (2006). Ülevaade Tartu linna geodeetilise põhivõrgu rekonstrueerimisest. – *Geodeet nr 32 (56)*. Lk 13–15.
- Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra 2020. [veebileht] <https://www.lgia.gov.lv/> (15.04.2021).
- Leica Captivate Technical Reference Manual (i.a). Version 3.0. English. 1060 lk. <https://www.manualslib.com/manual/1888980/Leica-Captivate.html> (15.04.2021).
- Liibus, A.; Ellmann, A.; Kall, T.; Kollo, K.** (2020). GNSS - Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem täpseks asukohamääranguks. Maaülikool [ilmumas].
- Liländer, G.** (2015). Vigala valla kohaliku geodeetilise põhivõrgu ülevaade ja rekonstrueerimise vajaduse hindamine. Bakalauareusetöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Maamõõte seadus (vastu võetud 26.03.1934) – *Riigi teataja nr.27* <https://dea.digar.ee/article/AKriigiteataja/1934/03/28/18> (15.04.2021).
- Maamõõte seaduse elluviimise määrus ja juhatuskiri. (Antud põllutööministri poolt 24. märtsil 1936). – *Riigi Teataja nr. 43*. <https://dea.digar.ee/article/AKriigiteataja/1936/05/26/3> (15.04.2021).
- Marinković, G., Kuzmić, T., & Trifković, M.** (2018). Optimization of geodetic network for the restoration of surveying in CM Vojvoda Stepa. – *Zbornik radova Građevinskog fakulteta, Subotica*, (33). Lk 85–100.
- Metsar, J., Kollo, K., Ellmann, A., Rüdja, A., Pihlak, P.** (2019). Multi-Epoch GNSS Campaigns of the National Geodetic Network in Estonia. – *Geophysica*, 54 (1). Lk 51–60.
- Must, K.** (2019). Tartu, Vahi tn polügonomeetria rekonstrueerimine. Geodeetiliste tööde aruanne. Tartu. 16 lk.
- Orlov, C.** (2001) Tartu linna 1 järgu polügonomeetria võrgu tasandamine L-Est 92 süsteemis. Bakalauureusetöö Eesti Maaülikooli Geomaatika osakonnas.
- Pajos, E. (1938).** Linna maamõõtja tegevusalad tänapäeval. – *Geodeet : maamõõte ja kultuurtehnika ajakiri* 1-4. Lk 32–39. <https://www.digar.ee/viewer/et/nlib-digar:399921> (23.04.2021).
- Papo, H. B.** (1985). Extended free net adjustment constraints. – *Bulletin géodésique*, 59(4), 378-390.
- Pertmann, J., A.** (2004). Geodeetilise mõõdistusvõrgu koostasandus programmiga GEO 2003. Bakalauureusetöö Eesti Maaülikooli Geomaatika osakonnas.
- Pertmann, J., A.** (2007). Tartu linna geodeetilise põhivõrgu 2. ja 3. järgu täpsuse hindamine. Magistri-töö Eesti Maaülikooli Geomaatika osakonnas.
- Piirainen, T.** (2009) Keravan kaupungin runkopisteverkon saneeraus. Insinööritö. Metropolia Ammatikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200912188347> (23.04.2021).
- Pope, A. J.** (1976). The statistics of residuals and the detection of outliers. – *NOAA Technical Report NOS65 NGS1*. US Department of Commerce, National Geodetic Survey Rockville, Maryland.

- Potter, H., Treikelder, I.** (2010). Geodeetiliselt põhistatud mõõdistamise algus Tallinnas. – *Geodeet* 40 (64). Lk 37–40.
- Poutanen, M., Häkli, P.** (2018). Future of National Reference Frames—from static to kinematic? – *Geodesy and Cartography* 67. Lk 117–129.
- Pullmann, V.** (2017). Staatiliste GNSS andmetöötlustarkvarade võrdlus. Magistritöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Pöder, V.** (2000). Tõrva linna geodeetilise võrgu rekognostseerimine ja L-Est'92 süsteemi transformeerimine. Bakalareusetöö Eesti Maaülikooli Geomaatika osakonnas.
- Randjärv, J.** (1997). Geodeesia I osa. Tartu. 360 lk.
- Randjärv, J.** (2002). Geodeesia IV osa. Kohalik geodeetiline põhivõrk. Tartu. 242 lk.
- Randjärv, J.** (2007). Geodeesia III osa. Geodeetiliste võrkude mõõtmistulemuste matemaatiline töötlemine. Tartu. 212 lk.
- Rofatto, V. F., Matsuoka, M. T., & Klein, I.** (2018). Design of geodetic networks based on outlier identification criteria: an example applied to the leveling network. – *Boletim de Ciências Geodésicas*, 24(2). Lk 152–170.
- Roosimäe, T.** (2017) Kohalike omavalitsuste geoarhiivide olemasolu ja seisukord Eestis. Magistritöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Rosenberg, B.** (2018). Võrgu RTK (VRS) kõrguslik täpsus Lõuna-Eestis. Bakalareusetöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Rüdja, A.** (2004). Geodetic datums, reference systems and geodetic networks in Estonia. Suomen Geodeettisen Laitoksen Julkaisuja. 311 lk.
- Rüdja, A., Sander, J.** (2013). Globaalne asukohamääramine. Innove. <http://www.digar.ee/id/nlib-digar:187790> (15.04.2021).
- Ruumiandmete seadus (vastu võetud 17.02.2011, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.12.2020). *Riigi Teataja*. <https://www.riigiteataja.ee/akt/109102020004> (20.04.2021).
- Salumaa, L.** (2003). Kohaliku geodeetilise põhivõrgu eelarvutused. Bakalareusetöö TTÜ rakendusgeodeesia erialal.
- Svežova, M.** (2018). Võrgu RTK mõõteseriade täpsus. Magistritöö Eesti Maaülikooli digitaalarhiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Štroner, M., Urban, R., Královič, J.** (2013) Testing of the relative precision in local network with use of the Trimble GEO XR GNSS receivers. – *Reports on Geodesy*. Lk 27–36.
- Taaber, T.** (2002) Võru linna kohaliku geodeetilise põhivõrgu rekonstrueerimine. Bakalareusetöö Eesti Maaülikooli Geomaatika osakonnas.

- Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistamisele esitatavad nõuded (2016). Majandus- ja taris-  
tuministri määrus. (Vastu võetud 14.06.2016). – *Riigi Teataja*. [https://www.riigitea-  
taja.ee/akt/119042016003](https://www.riigitea-<br/>taja.ee/akt/119042016003) (16.05.2021)
- Torim, A.** (1991). Eesti territooriumil teostatud geodeetiliste tööde ajaloost. – *Tähetorni kalender* 67.  
Lk 78–84.
- Turk, M.** (2002). Kuressaare linna kohaliku põhivõrgu rekonstrueerimise projekt. Bakalureusetöö  
Eesti Maaülikooli Geomaatika osakonnas.
- User Manual SBG GEO Professional (2017). Svensk ByggnadsGeodesi AB. Stockholm. 999 lk.
- Uusmaa, J.** (2019). Hadnet võrgu täpsus ja efektiivsus. Bakalareusetöö Eesti Maaülikooli digitaalar-  
hiivis. <https://dspace.emu.ee> (15.04.2021).
- Vahuri, K.** (2004). Polügonomeetria mõõtmiste täpsustest kohalike plaaniliste geodeetiliste põhivõr-  
kude rekonstrueerimisel ja rajamisel. Bakalureusetöö TTÜ rakendusgeodeesia erialal.
- Vietēja ģeodēziskā tīkla noteikumi (2012). – *Latvijas Vēstnesis*, 117, 26.07.2012. [https://li-  
kumi.lv/ta/id/250460-vieteja-geodeziska-tikla-noteikumi](https://li-<br/>kumi.lv/ta/id/250460-vieteja-geodeziska-tikla-noteikumi) (23.04.2021).
- Villar-Cano, M., Marqués-Mateu, Á., & Jiménez-Martínez, M. J.** (2019). Triangulation network of  
1929–1944 of the first 1: 500 urban map of València. *Survey Review*.
- Welsch, W.** (1979). A review of the adjustment of free networks. – *Survey Review*, 25(194), 167-180.
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D.** (2006). Adjustment Computations, Statistics and Least Squares in Sur-  
veying and GIS. John Wiley & Sons. Inc. 544 lk.

**LISAD**

**Lisa 1. Nõuded Soome kohaliku võrgu klass E5, Eesti KGV 2. järgu ja Läti kohaliku võrgu (VT) punktide mõõtmisele.**

	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
Nõuete allikas	JHS 184. Kiintopistemittaus EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä (2017)*	Kohaliku geodeetilise võrgu rajamise ja rekonstrueerimise juhend (2018), Geodeetiliste tööde tegemise ja geodeetilise märgi tähistamise kord, geodeetilise märgi kaitsevööndi ulatus ning kaitsevööndis tegutsemiseks loa taotlemise kord (2013)*	Vietēja ģeodēziskā tīkla noteikumi (2012)*
Üldised täpsusnõuded	Võrdlus kontrollpunktide koordinaatidega: N, E. $\pm 4$ cm H: $\pm 7$ cm	Võrgu punkti plaanilise asendi keskmine ruutviga $\pm 2$ cm kohaliku võrgu lähtepunktide suhtes. Nivelleerimiskäigu või polügooni sulgemisviga kuni $\pm 5\sqrt{n}$ mm või $\pm 20\sqrt{L}$ mm (n – seisupunktide arv käigus, L – käigu pikkus km)	Riigi geodeetilise võrguga sidumise täpsus 3–6 cm; Kõrguste määramise standardhälve kuni 1 cm, koordinaatide oma kuni 2 cm
<b>GNSS mõõtmised</b>			
Aktsepteeritud meetod?	Täielikult	Lubatud, aga täpsustama, mis juhtudel. Allpool toodud nõuded kehtivad KGV 1. järgu punktidele, 2. järgu punktide puhul nõudeid toodud pole	Lubatud: eraldiasetsevad punktid, mis asuvad avatud horisondiga alal. Muidu polügonomeetria. Kohaliku geodeetilise võrgu regulatsioonidest
<b>Planeerimine</b>			
<b>Lähtepunktide valik</b>			
Klass	Vähemalt E4		
Arv	Vähemalt 3	Täpsustamata. Moodustuma peab kolmnurkadest koosnev lausvõrk.	
Kaugus mõõdalast	Mitte rohkem kui 100 km		
Asukoht	Mõõdalal või sellest väljaspool		
<b>Kontrollpunktide valik</b>			
Klass	E5	Pole ette nähtud	
Arv	Vähemalt 1 punkt mõõdala kohta		
Asukoht	Mõõdalal või kuni 1 km kaugusel mõõdala piirist		
<b>Võrgu ehitus</b>			

	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
Korraga töötavate vastuvõtjate minimaalne hulk	Vähemalt 1 (kasutades) püsijaamu	Täpsustamata, aga kuna püsijaamade kasutamisega pole arvestatud, siis vähemalt 2.	
Soovituslik punktide vahekaugus	100-500 m		
Kõrvuti asetsevate punktide vaheline vektor tuleb otse mõõta	Jah, kui nende vahe on väiksem kui 500 m ja soovitatav, kui punktide vahel on nähtavus		
Mõõtesessioonide planeerimine			
Sessiooni miinimumpikkus	Vähemalt 30 minutit, vastavalt võrgu pikima vektori pikkusele	90 minutit	
PDOP	Mitte rohkem kui 5		
Satelliitide arv (75% ajast)	Vähemalt 5		
Mõõtmispaiga omadused	Võimalikult avatud horisont 15–20° tõusunurgast ülalpool. Vältida keskkonda, kust signaalid peegelduks.		
Nõuded GNSS antennile ja vastuvõtjale			
Vastuvõtja	Kui vektori pikkus on üle 10 km, siis tuleb kasutada kahesageduslikku vastuvõtjat. Vastuvõtjad peavad võimaldama täistsüklite kasutamist.	Tuleb kasutada kahesageduslikku vastuvõtjat. Vastuvõtjad peavad võimaldama täistsüklite kasutamist	
Antenni tüüp	Tuleb kasutada antennitüüpi, mille parameetrid on tasandusprogrammi jaoks tuttavad.	Tuleb kasutada <i>choke ring</i> tüüpi põhjaplaadiga ( <i>ground plane</i> ) antenni või teisi vähemalt samasuguste peegeldumist vähendavate omadustega antenni. Kasutatavad GNSS antennid peavad olema samatüübilised, s.o	

	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
		antennide faasitsentrite muutus peab olema identne	
<b>Välitöö</b>			
Soovituslik salvestamissagedus	1, 5, 10, 15 või 30 s		
Antenni tsentreerimine ja kõrguse mõõtmine	1 mm täpsusega	1 mm tsentreerimistäpsust peab võimaldama kasutatav märgitüüp ja tema tsentrimärgistus	
Antenni kõrguse mõõtmine	Enne ja pärast mõõtmisi		
Antenni kõrguste suurim lubatud vahe kahel mõõtmisel	3 mm		
Tõusunurk vastuvõtjas	5 °		
<b>Järeltöötlus</b>			
Vaatluste tõusunurk järeltöötluses	10-20 °		
Algtundamtute lahend vektorarvutuses	Ainult $\hat{f}x$ -lahendid		
Efemeriidid	Täpsed (otseedastatud efemeriidid sobivad, kui kõik vektorid on alla 10 km)		
Nõuded võrgu tasandusele	Vaba võrgu (üks punkt lähtepunktina) ja seotud võrgu tasanduste koordinaatide vahe alla 25 mm (maatõusumudeli kasutamine võib aidata)	Mõõdetud vektoritest koosnev võrk tuleb tasandada vähimruutude meetodil. Kasutatav tarkvara peab võimaldama tulemuste täpsushinnangu otsest võrdlust nõuetega (peab olema antud koordinaatide täpsushinnang).	
<b>Polügonomeetria mõõtmine</b>			



	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
Aktsepteeritud meetod?	Jah	Jah	Jah
Tahhümeetri täpsusnõuded			
Nurga mõõtmise täpsus vähemalt	±2"	±1,5"	±3"
Vertikaalnurga mõõtmise täpsus vähemalt	±5"		
Kauguse mõõtmise täpsus vähemalt	±3 mm + 2 ppm	± 2 mm + 2 ppm	
Kalibreerimine	Nõutud	Nõutud	
Lähtepunktide valik			
Klass, vähemalt	E4	KGV 1. järk, kõrguslikeks lähtepunktideks (lähterepeeriteks) peavad olema riikliku kõrgusvõrgu reeperid	Riikliku geodeetilise võrgu punktid, piisava täpsusega määratud globaalse positsioneerimise punktid, 1. ja 2. klassi nivelleerimise punktid
Arv ja tihedus	Vähemalt 2	Lähtepunktide paiknemise keskmiseks tiheduseks peab olema üks punkt 1,2 km <sup>2</sup> koht. Kõrguslike lähterepeerite minimaalseks arvuks on 3.	Vähemalt 3, lähtepunktide vahe tiheasustusega aladel kuni 1 km ja hajaasustuse korral kuni 2 km
Kontrollpunktide valik (kui mõõdotalas on vastava klassi punkte)			
Klass, vähemalt	E5	Pole ette nähtud	Pole ette nähtud
Arv	Vähemalt 1 punkt mõõdala kohta		
Asukoht	Käigu punktide nähtavuses		
Võrgu ehitus			
Ehitus	Polügonomeetriakäik või käikude süsteem		
Käigu maksimumpikkus	2 km		
Maksimaalne määratavate punktide hulk, mis jääb lähtepunktide vahele	8		

	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
Punktide soovituslik vahekaugus	100–500 m		
Ühe käigujoone pikkus trigonomeetrilise nivelleerimise korral			Soovitavalt kuni 150 m, mitte üle 200 m
Mõõtmised			
Tsentreerimistäpsus	1 mm	1 mm tsentreerimistäpsust peab võimaldama kasutatav märgitüüp ja tema tsentrimärgistus	
Prisma ja instrumendi kõrguse mõõtmistäpsus	2 mm		
Suundade mõõtmine	4 täisvõtet	3 täisvõtet	2 täisvõtet
Täisvõtete maksimum- ja miinimumtulemuse lubatud erinevus	6,5"		
Kauguste mõõtmine	Iga poolvõtte käigus (4+4)	Iga poolvõtte käigus (3+3)	
Kauguste mõõtmiste maksimum- ja miinimumtulemuse lubatud erinevus	15 mm		
Ilma-andmed	Mõõtmiste käigus tuleb mõõta õhutemperatuur ja õhurõhk		
Tasandusarvutused			
Tarkvara		Tarkvara peab võimaldama tulemuste täpsushinnangu otsest võrdlust nõuetega (antud peab olema	

	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
		koordinaatide täpsushinnang) ning käikude süsteemide (võrgu) tasandamist. Polügonomeetriakäikude süsteemi tasandamine üksikkäikudena ei ole lubatud	
Nurgamõõtmised			Mõõtmiste lubatud standardhälve 5" (tihedalt täisehitatud alal) või 7" (hajusalt asustatud alal)
Kauguste mõõtmised	Joone eri otstest mõõdetud tasandatud joonepikkuste vahe kuni 6 mm		Joonemõõtmise standardhälve kuni 5 mm +20 ppm (tiheasustus) või 5 mm + 20 ppm hajaasustus
Edasi-tagasi kõrguskasvude vahe kahe punkti vahel	$30 \cdot \sqrt{2 \cdot s}$ mm s- joonepikkus [km]		
Kõrguslik sulgemisviga	$30 \cdot \sqrt{L}$ mm L- käigu pikkus [km]	$\pm 5 \sqrt{n}$ mm või $\pm 20 \sqrt{L}$ mm n -seisupunktide arv käigus L -käigu pikkus [km]	
Tasandamata käigu sulgemisviga	Kuni $45 \cdot L$ mm L- käigu pikkus [km]		
RTK mõõtmine			
Aktsepteeritud meetod?	Jah, kui kaugus naaberpunktidest on rohkem kui 500 m ja nende vahel puudub nähtavus	Ei	Ei
Lähtepunktide valik			
Kaugus baasjaamast	Kuni 10 km ühe baasjaamaga mõõtmise korral ja võrgu RTK lahenduse korral juhul, kui mõõdetakse püsijaamade võrgu piiridest väljaspool		
Lähtepunktide klass, vähemalt	E4		

	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
Kontrollpunktide valik			
Klass	E5		
Arv	Vähemalt 1		
Välitöö			
Baasjaam	Statiiv ja treeger, tsentreerimistäpsus 1 mm		
Liikuvjaam	Statiiv ja treeger või kuni 2 m sau sauahoidjaga, tsentreerimistäpsus 5 mm		
Tõusunurk	Baasjaamas 5–10° Liikuvjaamas 10–15°		
PDOP	Maksimumväärtus 5		
Satelliitide arv	Minimaalselt 6		
Vaatluste/epohhide salvestamise intervall	1 sek		
Epohhe mõõtmise kohta	5–15		
Mõõtmisi mõõteseerias	5		
Mõõteseeriaid kokku	2		
Igal mõõtmisel initsialiseerimine?	Jah		
Initsialiseerimisele kuluv aeg	Kuni 2 min		
Sarjade vahele jääv aeg	45 min		
Koordinaatide erinevus mõõteseerias (erinevate	N,E: 20 mm h: 40 mm		

	Soome E5 klassi punktid	Eesti KGV 2. järgu punktid	Läti kohalik võrk (VT)
initsialiseerimistega mõõdetud			
Kahe mõõteseeria koordinaatide erinevus	N,E: 40 mm h: 70 mm		

\*Tabelis täidetud ainult need lahtrid, mille kohta selgesõnalise juhise leiab

## Lisa 2. Tasandusaruande näidis programmiga TBC

Project File Data		Coordinate System	
Name:	C:\Users\kmets\Documents\Magistriopingu\Magistrit88\20064_seotud.vce	Name:	Estonia/EST97
Size:	109 KB	Datum:	EST97
Modified:	30-Apr-21 1:48:05 AM (UTC:3)	Zone:	Estonia
Time zone:	FLE Standard Time	Geoid:	EST-GEOID2017
Reference number:		Vertical datum:	
Description:		Calibrated site:	
Comment 1:			
Comment 2:			
Comment 3:			

---

## Network Adjustment Report

---

### Adjustment Settings

#### Set-Up Errors

##### GNSS

Error in Height of Antenna: 0.0000 m

Centering Error: 0.0000 m

#### Covariance Display

##### Horizontal:

Propagated Linear Error [E]: U.S.

Constant Term [C]: 0.0000 m

Scale on Linear Error [S]: 1.960

##### Three-Dimensional

Propagated Linear Error [E]: U.S.

Constant Term [C]: 0.0000 m

Scale on Linear Error [S]: 1.960

---

## Adjustment Statistics

Number of Iterations for Successful Adjustment: 2  
 Network Reference Factor: 1.00  
 Chi Square Test (95%): Passed  
 Precision Confidence Level: 95%  
 Degrees of Freedom: 11

### Post Processed Vector Statistics

Reference Factor: 1.00  
 Redundancy Number: 11.00  
 A Priori Scalar: 1.27

## Control Coordinate Comparisons

Values shown are control coordinates minus adjusted coordinates.

Point ID	$\Delta$ Easting (Meter)	$\Delta$ Northing (Meter)	$\Delta$ Elevation (Meter)	$\Delta$ Height (Meter)
<a href="#">JOGE</a>	?	?	?	-0.0066
<a href="#">MEHI</a>	?	?	?	0.0150
<a href="#">TOR2</a>	?	?	?	-0.0034

## Control Point Constraints

Point ID	Type	East $\sigma$ (Meter)	North $\sigma$ (Meter)	Height $\sigma$ (Meter)	Elevation $\sigma$ (Meter)
<a href="#">JOGE</a>	Global	Fixed	Fixed		
<a href="#">MEHI</a>	Global	Fixed	Fixed		
<a href="#">TOR2</a>	Global	Fixed	Fixed		
Fixed = 0.000001(Meter)					

## Adjusted Grid Coordinates

Point ID	Easting (Meter)	Easting Error (Meter)	Northing (Meter)	Northing Error (Meter)	Elevation (Meter)	Elevation Error (Meter)	Constraint
<a href="#">20064</a>	660427.6562	0.0034	6471584.1027	0.0053	35.0562	0.0276	

<a href="#">JOGE</a>	639297.9691	?	6516070.2483	?	90.8312	0.0312	LL
<a href="#">MEHI</a>	703726.0099	?	6460222.6472	?	41.1611	0.0279	LL
<a href="#">TOR2</a>	644445.8213	?	6460871.6647	?	76.9250	0.0237	LL

Coordinates from a free adjustment should only be used for analysis of the inner accuracy of the network. They should not be distributed as final results.

### Adjusted Geodetic Coordinates

Point ID	Latitude	Longitude	Height (Meter)	Height Error (Meter)	Constraint
<a href="#">20064</a>	N58°21'19.02870"	E26°44'27.97736"	53.9978	0.0276	
<a href="#">JOGE</a>	N58°45'42.04595"	E26°24'27.64541"	109.1837	0.0312	LL
<a href="#">MEHI</a>	N58°14'07.41736"	E27°28'10.90466"	59.4091	0.0279	LL
<a href="#">TOR2</a>	N58°15'53.06458"	E26°27'41.69092"	96.2384	0.0237	LL

Coordinates from a free adjustment should only be used for analysis of the inner accuracy of the network. They should not be distributed as final results.

### Adjusted ECEF Coordinates

Point ID	X (Meter)	X Error (Meter)	Y (Meter)	Y Error (Meter)	Z (Meter)	Z Error (Meter)	3D Error (Meter)	Constraint
<a href="#">20064</a>	2995703.6504	0.0139	1509375.7487	0.0080	5406649.4757	0.0233	0.0283	
<a href="#">JOGE</a>	2969871.1821	?	1474753.0248	?	5430309.4241	?	?	LL
<a href="#">MEHI</a>	2986351.0644	?	1552588.9785	?	5399635.9901	?	?	LL
<a href="#">TOR2</a>	3010734.0933	?	1498576.8200	?	5401387.3442	?	?	LL

Coordinates from a free adjustment should only be used for analysis of the inner accuracy of the network. They should not be distributed as final results.



## Error Ellipse Components

Point ID	Semi-major axis (Meter)	Semi-minor axis (Meter)	Azimuth
<a href="#">20064</a>	0.0067	0.0043	4 deg

## Adjusted GNSS Observations

### Transformation Parameters

Azimuth Rotation: -0.016 sec (95%) 0.015 sec

Scale Factor: 0.99999995 (95%) 0.00000009

Observation ID		Observation	A-posteriori Error	Residual	Standardized Residual
<a href="#">TOR2 --&gt; 20064 (PV160)</a>	Az.	58.269607835 deg	0.054 sec	0.020 sec	0.912
	ΔHt.	-42.2407 m	0.0392 m	-0.0116 m	-0.849
	Ellip Dist.	19240.8660 m	0.0045 m	-0.0039 m	-2.339
<a href="#">MEHI --&gt; 20064 (PV145)</a>	Az.	287.665323704 deg	0.027 sec	0.032 sec	2.065
	ΔHt.	-5.4113 m	0.0443 m	0.0191 m	0.922
	Ellip Dist.	44766.2358 m	0.0050 m	0.0003 m	0.206
<a href="#">JOGE --&gt; TOR2 (PV162)</a>	Az.	176.728568225 deg	0.015 sec	-0.021 sec	-1.702
	ΔHt.	-12.9452 m	0.0442 m	0.0024 m	0.132
	Ellip Dist.	55441.4821 m	0.0050 m	0.0042 m	0.450
<a href="#">JOGE --&gt; 20064 (PV133)</a>	Az.	156.650217475 deg	0.023 sec	-0.022 sec	-0.933
	ΔHt.	-55.1859 m	0.0512 m	-0.0016 m	-0.032
	Ellip Dist.	49252.3074 m	0.0071 m	0.0061 m	0.828
<a href="#">JOGE --&gt; MEHI (PV146)</a>	Az.	132.976413098 deg	0.015 sec	0.011 sec	0.918
	ΔHt.	-49.7746 m	0.0489 m	0.0143 m	0.538
	Ellip Dist.	85268.9627 m	0.0077 m	0.0081 m	0.794
<a href="#">TOR2 --&gt; MEHI (PV161)</a>	Az.	92.731786842 deg	0.015 sec	0.009 sec	0.511
	ΔHt.	-36.8294 m	0.0428 m	0.0173 m	0.726
	Ellip Dist.	59286.1804 m	0.0054 m	-0.0036 m	-0.480

## Covariance Terms

From Point	To Point		Components	A-posteriori Error	Horiz. Precision (Ratio)	3D Precision (Ratio)
<a href="#">20064</a>	<a href="#">JOGE</a>	Az.	336.934693508 deg	0.017 sec	1 : 9969950	1 : 9869519
		ΔHt.	55.1859 m	0.0512 m		
		ΔElev.	55.7750 m	0.0512 m		
		Ellip Dist.	49252.3051 m	0.0049 m		
<a href="#">20064</a>	<a href="#">MEHI</a>	Az.	107.045463296 deg	0.024 sec	1 : 12722338	1 : 12582060
		ΔHt.	5.4113 m	0.0443 m		
		ΔElev.	6.1049 m	0.0443 m		
		Ellip Dist.	44766.2338 m	0.0035 m		
<a href="#">20064</a>	<a href="#">TOR2</a>	Az.	238.507460181 deg	0.050 sec	1 : 4525163	1 : 4610885
		ΔHt.	42.2406 m	0.0392 m		
		ΔElev.	41.8688 m	0.0392 m		
		Ellip Dist.	19240.8652 m	0.0043 m		
<a href="#">JOGE</a>	<a href="#">MEHI</a>	Az.	132.976417440 deg	0.000 sec	1 : 0	1 : 2973525572
		ΔHt.	-49.7746 m	0.0489 m		
		ΔElev.	-49.6701 m	0.0489 m		
		Ellip Dist.	85268.9588 m	0.0000 m		
<a href="#">JOGE</a>	<a href="#">TOR2</a>	Az.	176.728572567 deg	0.000 sec	1 : 0	1 : 5191873806
		ΔHt.	-12.9453 m	0.0442 m		
		ΔElev.	-13.9062 m	0.0442 m		
		Ellip Dist.	55441.4796 m	0.0000 m		
<a href="#">MEHI</a>	<a href="#">TOR2</a>	Az.	273.589050728 deg	0.000 sec	1 : 0	1 : 2216961459
		ΔHt.	36.8293 m	0.0428 m		
		ΔElev.	35.7639 m	0.0428 m		
		Ellip Dist.	59286.1777 m	0.0000 m		

Date: 30-Apr-21	Project:	Trimble Business
10:10:38 AM	C:\Users\kmets\Documents\Magistriopingud\Magistrit88\20064_seotud.vce	Center

### Lisa 3. Väljavõte tasandusaruandest programmis SBG Geo

Horizontal Net Adjustment

Created:  
8/10/2020

Net adjustment file:

C:\Users\Public\Documents\Sbg\Projects\Jaama\Jaama\_10005\_lisaks\_strict\_magistrit88sse.HNA

Calculation:	Adjustment	Method	Strict adjustment
No of observations:	218		Relative redundancy: 0.95
No of unknown:	11		Min allowed (HMK): 0.5
Rank defect:	0		
Redundancy:	207		Std error of unit weight: 0.94 Max allowed (HMK): 1.08

A priori std deviations:

(Please note: These are the last used standard settings, values can differ for individual measurements)

Directions:	0.0003	No of Rounds:	1
Oriented directions:	0.002	No of Rounds:	1
Distances:	0.001	+ 1.5000 ppm	
		Coordinates	0.02
Centering:	0.002	Coordinate differences:	0.005

Distribution of Std Residual

Sigma level:	Value	No of observations	Accumulated (%)	Theoretical (%)
1	0.0 – 1.0	168	77.06	68.01
2	1.0 – 2.0	35	93.12	95.57
3	2.0 – 3.0	15	100	99.69
3+	3.0 -	0	100	100
?	no valid value	0	100	

Horizontal Net Adjustment, Control Points

Created:  
8/10/2020

No of points 6

Point Centering err.	N	0	a-axis sN	b-axis sE	Angle a/b
10005	6,474,610.9 5	660667.28 9	0	0	50
0.002			0	0	
10029A	6,474,358.3 6	662038.77	0	0	50
0.002			0	0	
10030	6,474,398.4 4	661832.59	0	0	50
0.002			0	0	
10032	6,474,421.7 1	661253.69	0	0	50
0.002			0	0	
10033	6,474,535.6 3	660811.05	0	0	50
0.002			0	0	

Horizontal Net Adjustment, New Points

Created:  
8/10/2020

No of points 3

Point Centering err.	N	0	a-axis sN	b-axis sE	Angle a/b
1000	6,474,465. 60	661079.13 4	0.0005	0.0005	101.0559
0.002			0.0005	0.0005	0.9956
10031	6,474,413. 59	661574.06 15	0.0006	0.0006	1.7827
0.002			0.0006	0.0006	0.9373
11395	6,474,078. 77	660930.48 8	0.0013	0.001	112.7709
0.002			0.0011	0.0013	0.7809

Horizontal net adjustment,  
directions

Created:  
8/10/2020

		From point	To point
Max residual:	-0.0025	10030	10029A
Max Std Residual:	-2.9452	10030	10029A

No of stations: 5  
No of directions: 99

Type	From point To point	Value A pr. Std dev A pr. SD+C	Residual Adj. Std dev MDE	Adj Direction Oriented Dir ER	Std Residual R number
Direction	1000	316.2664	0.0004	316.2668	0.612
	10033	0	0.0002	316.2669	0.9403
		0.0005	0.0001	0	
Direction	1000	316.2664	0.0004	316.2668	0.612
	10033	0	0.0002	316.2669	0.9403
		0.0005	0.0001	0	
Direction	1000	223.3558	0	223.3558	-0.028
	11395	0	0.0001	223.3559	0.9167
		0.0003	0.0001	0	
Direction	1000	115.6812	0	115.6812	-0.0019
	10032	0	0.0003	115.6813	0.9372
		0.0007	0.0001	0	
Direction	1000	115.6799	0.0013	115.6812	1.3808
	10032	0	0.0003	115.6813	0.9372
		0.0007	0.0001	0	
Direction	1000	223.355	?? 0.0008	223.3558	1.8664
	11395	0	0.0001	223.3559	0.9167
		0.0003	0.0001	0	

+384 rida

Horizontal net adjustment, distances

Created:  
8/10/2020

		From point	To point
Max residual:	0.0056	10033	10005
Max Std Residual:	1.8143	10033	10005

No of distances: 119

From point To point	Value A pr. Std dev A pr. SD+C	Residual Adj. Std dev MDE	Adj Value ER	Std Residual R number
1000	414.4035	-0.0003	414.4032	-0.0853
11395	0.0027	0.0009		0.9412
	0.0034	0.0079	0.0005	
1000	277.0823	-0.002	277.0802	-0.5768
10033	0.0023	0.0005		0.9811
	0.0031	0.0066	0.0001	
1000	277.0823	-0.002	277.0802	-0.5768
10033	0.0023	0.0005		0.9811
	0.0031	0.0066	0.0001	
1000	414.4032	0	414.4032	0.0009
11395	0.0027	0.0009		0.9412
	0.0034	0.0079	0.0005	
1000	179.9915	-0.0027	179.9888	-0.7943
10032	0.002	0.0005		0.9793
	0.0029	0.0058	0.0001	
1000	179.9911	-0.0023	179.9888	-0.6772
10032	0.002	0.0005		0.9793
	0.0029	0.0058	0.0001	

+417 rida

Suuna- ja kaugusemõõtmise andmetest esitati vaid näidis, vastasel juhul oleks töö lisade maht läinud ebamõistlikult suureks.

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Kärt Metsoja, sünniaeg 22.01.1981,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
„Kohalike geodeetiliste võrkude hooldamisest ja kasutamisest Tartu linna näitel“,

mille juhendaja on Tarmo Kall ja kaasjuhendaja Janno Vään,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuand-  
mete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_  
(allkirjastatud digitaalselt)

Tartu, 30.05.2021

---

**Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

Tarmo Kall

\_\_\_\_\_  
(allkirjastatud digitaalselt)

Janno Vään

\_\_\_\_\_  
(allkirjastatud digitaalselt)